

Direction des bibliothèques

AVIS

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

**Apport d'une activité d'apprentissage intégrant l'histoire des
sciences à l'enseignement de la physique au niveau collégial**

par

Pascal Pelletier-Boudreau

Département de didactique
Faculté des sciences de l'éducation

Mémoire de recherche présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de maîtrise
en sciences de l'éducation - didactique

Août 2008

© Pascal Pelletier-Boudreau, 2008



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Apport d'une activité d'apprentissage intégrant l'histoire des
sciences à l'enseignement de la physique au niveau collégial

présenté par

Pascal Pelletier-Boudreau

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

France Caron
président-rapporteur

Marcel Thouin
directeur de recherche

Jesus Vazquez-Abad
membre du jury

Résumé

Cette recherche est inspirée des travaux sur le rôle de l'histoire des sciences dans le curriculum scientifique (Monk, Osborne, 1997; Matthews, 1994) et des recherches sur les processus de changement conceptuel (Posner, al. 1982; Giordan, Vecchi, 1989).

Une activité d'apprentissage basée sur l'histoire des sciences a été développée et testée dans un cours de physique du niveau collégial pré-universitaire québécois. L'activité d'apprentissage porte sur la nature de la lumière, plus spécifiquement sur la vision, sur la nature ondulatoire de la lumière et sur la dualité onde-corpuscule.

Les conceptions de quatre-vingts élèves ont été sondées par un prétest initial et par un post-test suite à la réalisation de l'activité d'apprentissage. La comparaison des conceptions énoncées par les élèves permet de conclure que quelques conceptions initiales ont évolué lors de l'activité d'apprentissage, alors que d'autres conceptions initiales sont demeurées inaltérées. Les données recueillies lors de l'activité d'apprentissage semblent indiquer que les conflits d'ordre sociaux-cognitif pourraient être à l'origine de l'évolution des conceptions.

Mots clés : histoire des sciences, conceptions, changement conceptuel, vision, lumière, enseignement des sciences, enseignement collégial, cégep, constructivisme.

Abstract

This research is based on work regarding the integration of history of science in scientific curriculum (Monk, Osborne, 1997; Matthews, 1994) and on studies concerning conceptual change (Posner, al. 1982; Giordan, Vecchi, 1989).

A learning activity based on the history of science has been designed and tested in a physics course with pre-university college science students. The learning activity concerns the nature of light, namely concepts of vision, wave model and wave particle duality.

Pretest and post-test were used to evaluate the conceptions of eighty students prior and after the realisation of the learning activity. Student conception comparison showed that some of the initial conceptions have evolved after the learning activity, while others remained unchanged. Data gathered during the activity suggest that social cognitive conflicts may have engendered the conceptual change.

Key words: History of sciences, conceptions, conceptual change, light, vision, pre-university science education, cegep, constructivism.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS.....	XII
INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE	4
1. Situation de la recherche sur l'approche historique dans les cours de sciences	9
• <i>Raisons en faveur de l'introduction de l'histoire des sciences dans le curriculum d'un cours scientifique</i>	<i>10</i>
• <i>Opposition à l'introduction de l'histoire des sciences dans le curriculum d'un cours scientifique.....</i>	<i>12</i>
2. Mauvaise compréhension de la nature des sciences	13
3. Importance du processus de changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences.....	18
4. Parallèle entre le processus de changement conceptuel et l'évolution des concepts en sciences.....	19
5. Approches historiques proposées par certains curriculums scientifiques	22
Harvard Project Physics Course	22
Projet 2061	23
Le curriculum national britannique.....	24
6. Approche proposée par le programme québécois des sciences de la nature au collégial	25
7. Statut de l'histoire des sciences dans les outils d'enseignement en physique et dans la formation des enseignants.....	28

8. Une investigation historique portant sur les modèles de la
lumière comme outil pour favoriser le changement conceptuel 30

CADRE CONCEPTUEL 33

1. Trois points de vue constructivistes en didactique sur
l'appropriation des savoirs 34
 - *Le point de vue de Piaget* 35
 - *Le point de vue de Bachelard* 36
 - *Le point de vue Vygotski ou le socio-constructivisme* 37
2. Le processus de changement conceptuel 38
 - *La perspective de la rupture* 42
 - Le modèle de Nussbaum et Novick 42
 - Le modèle de Posner et al. 44
 - Le modèle de Hewson 47
 - Le modèle du dérangement épistémologique
de Larochelle et Désautels 48
 - Les expériences centrées sur le conflit
sociocognitif 52
 - *La perspective de la continuité* 55
 - Le modèle de Vosniadou 55
 - Le modèle de diSessa 56
 - *Le modèle allostérique de Giordan et Vecchi* 56
3. Méthodes d'apprentissage basées sur le travail en équipe 60
 - Apprentissage par problèmes 61
 - Apprentissage par projets 63
 - Apprentissage coopératif 63
 - Particularités des méthodes basées sur le
travail en équipes 64

4. Conceptions des élèves relatives à la vision et à la lumière.....	65
• <i>Synthèse de Galili et Hazan</i>	66
Schème de la vision spontanée	66
Schème de la lumière corporelle.....	67
• <i>Étude d'Ambrose et al.</i>	68
5. Éléments historiques reliés au développement des modèles de la lumière.....	69
• <i>Le modèle de la vision de l'Antiquité</i>	69
• <i>Le modèle de l'optique géométrique</i>	71
• <i>Le modèle ondulatoire au 17^{ième} siècle</i>	73
• <i>Le modèle corpusculaire de Newton</i>	75
• <i>Le modèle ondulatoire au 19ième siècle</i>	77
• <i>Le modèle de la dualité onde-corpuscule</i>	81
6. Éléments à retenir pour l'élaboration de l'investigation historique.....	84
7. Questions de recherche	86
CADRE MÉTHODOLOGIQUE	88
1. L'Investigation historique et les rapports de recherche	89
2. Les sujets.....	92
3. Le prétest et le post-test	94
• <i>Partie A</i>	94
• <i>Partie B</i>	96
• <i>Partie C</i>	101
• <i>Partie D</i>	103

ANALYSE ET INTERPRÉTATION	105
1. Conceptions relatives à la vision.....	106
• <i>Conceptions initiales des élèves.....</i>	<i>106</i>
Question 1	107
Question 2	111
Question 3	115
• <i>Conceptions suite à l'activité d'apprentissage</i>	<i>117</i>
2. Conceptions relatives aux modèles de l'optique ondulatoire.....	119
• <i>Conceptions initiales des élèves.....</i>	<i>119</i>
Question 7	120
Question 8	123
Question 9	126
• <i>Conceptions suite à l'activité d'apprentissage</i>	<i>128</i>
3. Conceptions relatives à la dualité onde-corpuscule	131
• <i>Conceptions initiales des élèves.....</i>	<i>131</i>
• <i>Conceptions suite à l'activité d'apprentissage</i>	<i>132</i>
4. Évolution conceptuelle lors de l'investigation historique.....	135
• <i>Développement d'une compréhension qualitative de la</i> <i>diffraction de la lumière.....</i>	<i>135</i>
• <i>Développement d'une compréhension qualitative du</i> <i>concept d'onde de probabilité.....</i>	<i>138</i>
• <i>Évolution des conceptions des membres de deux</i> <i>équipes</i>	<i>142</i>
Conceptions relatives à la vision	143
Conceptions relatives au modèle de l'optique	
ondulatoire	149

5. Réponses aux questions de recherches.....	151
• <i>Première question</i>	151
Vision.....	151
Optique géométrique et optique ondulatoire.....	153
Dualité onde corpuscule.....	154
• <i>Deuxième question</i>	155
Vision.....	155
Optique géométrique et optique ondulatoire.....	156
Dualité onde corpuscule.....	157
• <i>Troisième question</i>	157
CONCLUSION	159
BIBLIOGRAPHIE	164
ANNEXE 1 : FORMULAIRES UTILISÉS POUR LES RAPPORTS DE RECHERCHES	175
ANNEXE 2 : PRÉTEST ET POST - TEST	192
ANNEXE 3 : FICHES BIBLIOGRAPHIQUES	198

Liste des tableaux

Tableau 1 – Particularités des méthodes basées sur le travail en équipes.....	64
Tableau 2 : Conceptions des élèves énoncées aux questions 1 à 3	118
Tableau 3 : Nombre de réponses à la partie B en fonction des modèles utilisés..	128
Tableau 4 : Conceptions des élèves énoncées aux questions 7 à 9	129
Tableau 5 : Réponses à la partie D au prétest et post-test	133
Tableau 6 Réponses aux questions 1 et 2 de l'équipe A	144
Tableau 7 Réponses aux questions 1 et 2 de l'équipe B	146
Tableau 8 Modèles utilisés à la partie B par les membres des équipes A et B ...	149

Liste des figures

Figure 1 : Montage de la partie B du prétest.....	98
Figure 2 : Schéma qui représente la région illuminée dans le cas d'une ouverture large.....	99
Figure 3 : Schéma qui représente la région illuminée dans le cas d'une ouverture très mince	100
Figure 4 : Patron de diffraction	101
Figure 5 : Patron d'interférence.....	102
Figure 6 : Changements de réponses à la question 10 du prétest au post-test.....	134
Figure 7 : Schéma représentant une conception intuitive de la dualité onde-corpuscule	140

Remerciements

Ce travail ne se serait pas rendu jusqu'à ce point sans l'appui d'un nombre important de personnes. Aussi, il me semble que cet apport mérite d'être souligné à juste titre.

Tout d'abord, merci à mon directeur de recherche, Marcel Thouin, qui a cru dès le départ au projet même si l'enseignement collégial n'est pas son intérêt de recherche principal et qui m'a guidé depuis un peu plus de cinq ans dans cette recherche.

Merci à Marc Séguin et à Camil Cyr, tous deux enseignants de physique, qui ont encadré mon travail au Collège de Maisonneuve. Merci à Emmanuelle Goulet, enseignante au Cégep du Vieux Montréal, pour sa contribution aux fiches historiques utilisées pour cette recherche. Merci aux élèves du collège de Maisonneuve qui ont accepté de participer à cette étude.

Finalement, quelques mots pour ma famille. Compléter un projet de recherche alors qu'on travaille à plein temps demande parfois des sacrifices importants. Ces sacrifices, je ne suis certainement pas le seul à les avoir faits. Merci à ma conjointe, Marie-Josée, pour m'avoir encouragé et écouté, mais aussi pour avoir pris en charge plus que sa part de responsabilités à certains moments. Merci à mes deux filles, Éloïse et Chloé et à mon fils, le petit Arthur, pour tout leur amour et pour l'inspiration qu'ils me procurent.

Introduction

Le développement scientifique est indissociable de l'histoire de l'humanité. Celui-ci a directement et indirectement transformé la société humaine et son environnement, et en retour la société humaine a influencé et orienté le développement scientifique. La science a changé notre perception de nous-mêmes et du monde dans lequel nous vivons.

Toutefois, l'ouverture des jeunes québécois face aux sciences et à la technologie est en décroissance selon certains indicateurs stratégiques se rapportant à la formation postsecondaire dans ces disciplines (Conseil de la science et de la technologie 2002, p.172). Cette décroissance pourrait être liée à la façon dont on enseigne les sciences. Des critiques se retrouvent dans la littérature québécoise sur la question. Selon ces critiques, l'école entretiendrait une image *positiviste*¹ des sciences, plutôt que de les présenter comme une démarche imaginative, réflexive et interrogative (Godin, 1994). Ainsi, il serait déplorable que le curriculum n'accorde que peu ou pas de place aux dimensions philosophique, historique, sociale et morale des sciences.

D'autre part, plusieurs chercheurs soutiennent que la présentation de l'histoire des sciences pourrait rendre les sciences et leur enseignement plus engageants

¹ L'adjectif *positiviste* fait ici référence à l'épistémologie positiviste. L'épistémologie positiviste postule l'existence d'une méthode scientifique universelle et est à l'origine du découpage de la science en tranches disciplinaires. Les théories plus récentes en épistémologie ont remis en question cette vision plutôt rigide de la science.

(Matthews 1994, p.50). Il y aurait même un parallèle à faire entre l'évolution des concepts scientifique et l'évolution des conceptions chez l'élève. La présentation de l'histoire des sciences faciliterait ainsi le développement de nouvelles conceptions et permettrait de mieux représenter la nature réelle du processus de développement scientifique.

Afin d'intégrer l'histoire des sciences à l'enseignement des sciences, il conviendrait de développer des outils et des activités d'enseignement. En effet, bien que plusieurs recherches conviennent que l'histoire des sciences peut avoir un rôle important à jouer dans l'enseignement des sciences, très peu de recherches ont été menées dans un contexte réel d'enseignement (Monk, 1997). De plus, les buts généraux du programme collégial québécois intitulé Sciences de la nature (Ministère de l'Éducation du Québec, 1998) précisent que le curriculum devrait permettre de situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques et permettre de faire des liens entre la science, la technologie et l'évolution de la société. Cependant, l'enseignement traditionnel des sciences ne va pas en ce sens et les enseignants de sciences du niveau collégial québécois disposent de peu d'outils pour intégrer l'histoire des sciences.

Suite aux résultats de ces recherches, il paraît souhaitable d'expérimenter en situation réelle d'enseignement les possibilités qu'offre l'intégration de l'histoire des sciences à l'enseignement des sciences, et ce à tous les niveaux d'enseignement. D'autant plus qu'au niveau postsecondaire et plus

particulièrement au niveau collégial québécois, il y a très peu de publications à ce sujet. Il y a donc là un vide, un lien manquant entre certaines idées prônées dans les milieux éducatifs et la pratique de l'enseignement. L'intention de la présente recherche est de contribuer à combler ce vide par une étude portant sur une activité d'apprentissage intégrant l'histoire des sciences à l'enseignement de la physique au niveau collégial québécois.

Problématique

Depuis le début des années 90, on retrouve en sciences de l'éducation un nombre croissant de publications portant sur l'idée d'intégrer des éléments de l'histoire des sciences à l'enseignement scientifique (Tsai, 2005). L'origine de cette idée remonte par contre à des temps bien plus anciens. En fait, depuis le milieu du 19^{ème} siècle, un courant minoritaire dans les sciences de l'éducation a entretenu l'idée d'apporter des éléments de l'histoire des sciences à l'enseignement scientifique (Matthews, 1994; Seroglou & Koumaras, 2001). Sans remonter aussi loin, on présente en ouverture de ce chapitre une première section dressant un portrait de la recherche récente entourant l'argumentation en faveur de l'intégration de l'histoire des sciences.

L'argumentation en faveur de l'histoire des sciences mène naturellement à la question du « comment ». Bien qu'il soit généralement admis que l'histoire des sciences puisse avoir un rôle à jouer dans leur enseignement, peu d'études explorent des méthodes d'enseignement des sciences intégrant l'histoire des sciences. Ceci est la préoccupation principale à l'origine de ce travail. L'histoire des sciences ne pourra jouer un rôle significatif dans l'enseignement des sciences que lorsqu'il y aura un corpus de référence d'études menées en situation pratique d'enseignement. Faute de ce corpus et d'outils développés à partir de celui-ci l'histoire des sciences demeurera anecdotique dans l'enseignement des sciences.

La présentation de la problématique relative à cette recherche est structurée de façon à progresser logiquement de l'argumentation en faveur de l'histoire des

sciences vers cette préoccupation du « comment » l'histoire des sciences peut être intégrée en situation réelle d'enseignement des sciences. Suite à la présentation du portrait de la recherche en faveur de l'histoire des sciences, deux affirmations qui sont centrales à cette argumentation sont explorées. Une de ces affirmations est relative aux processus de changement conceptuel : selon plusieurs recherches, les processus du changement conceptuel ou de l'évolution conceptuelle, considérés comme des étapes principales lors de l'apprentissage des sciences, pourraient être favorisés par l'intégration de l'histoire des sciences (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Sequiera & Leite, 1991; Nersessian, 1991). D'autre part, des chercheurs qui prônent un meilleur enseignement de l'épistémologie et de la philosophie des sciences affirment que l'apport de l'histoire des sciences permettrait aussi de mieux représenter la nature des sciences (Schwartz, Lederman & Crawford, 2004; Allchin, D., 2003; Galili & Hazan, 2001; Irwin, 2000; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Bybee et al. 1991).

L'argumentation en faveur de l'introduction de l'histoire des sciences a influencé l'écriture de quelques curriculums scientifiques. Ces curriculums et les approches historiques qu'ils suggèrent sont présentés et discutés. Traditionnellement, les curriculums scientifiques ne sont pas écrits en vue d'une intégration d'éléments d'histoire des sciences et présentent une vision positiviste de la nature des sciences. Par contre, certaines exceptions se démarquent et proposent soit une utilisation importante de l'histoire des sciences, soit une intégration d'éléments exposant les liens entre la science, la technologie et la société (STS). Le

programme collégial québécois intitulé Sciences de la nature (Ministère de l'Éducation du Québec, 1998) comporte justement deux buts associés aux curriculums de type STS. Ces buts sont : « *établir des liens entre la science, la technologie et l'évolution de la société* » et « *situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques* » (Ministère de l'Éducation du Québec, 1998). Face à ces objectifs curriculaires, le statut accordé à l'histoire des sciences dans les manuels et dans la formation des enseignants en physique au niveau collégial québécois et abordé et on explique comment ces outils et cette formation ne favorisent pas l'introduction d'histoire des sciences dans les cours de sciences.

Finalement, considérant que les arguments en faveur de l'apport de l'histoire des sciences dans les cours de sciences semblent valides, la suite logique est la préoccupation principale de cette recherche : comment est-il possible d'intégrer des éléments d'histoire aux cours de sciences de façon à favoriser les processus de changements conceptuels et de façon à mieux représenter la nature des sciences? Comme les curriculums et les outils dont disposent les enseignants du collégial sont peu documentés en ce sens, et comme la formation scientifique des enseignants ne les prépare pas à aborder des éléments d'histoire, l'objet principal de cette recherche est une activité d'apprentissage afin d'explorer les possibilités qu'offre l'utilisation de l'histoire des sciences. Cette activité prend la forme d'une investigation historique sur les modèles de la lumière. Une question générale de recherche est formulée en regard à cette investigation. Bien qu'il ne soit pas exclu que cette investigation historique puisse influencer l'épistémologie des élèves, la

question générale ne porte que sur l'argument qui veut que l'apport de l'histoire des sciences favorise le processus d'évolution des concepts de l'apprenant. En effet, la durée relativement courte de l'investigation historique proposée porte à croire que son effet sur l'épistémologie des élèves sera difficilement observable.

1. Situation de la recherche sur l'approche historique dans les cours de sciences

L'utilisation de l'histoire dans l'enseignement des sciences est assez largement suggérée par plusieurs chercheurs. Un groupe de recherche international, le « *International History & Philosophy of Science Teaching Group* » (IHPST), vise à faire la promotion du rôle de l'histoire et de la philosophie dans l'enseignement des sciences et s'intéresse particulièrement à la formation des futurs enseignants. Ce groupe est composé de plusieurs membres répartis dans quatorze pays. Le groupe est associé au journal « *Science & Education* ». L'éditeur de ce journal, Michael Matthews, est un professeur largement cité de l'université New South Wales en Australie. Il a publié un livre incontournable, *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science* (Matthews, 1994), et plusieurs articles argumentant en faveur de l'utilisation de l'histoire et de la philosophie des sciences dans l'enseignement scientifique.

Plus près de la réalité canadienne et québécoise, le professeur Arthur Stinner de l'université du Manitoba est le président du groupe IHPST (mentionné ci haut) et d'un second groupe associé à l'université du Manitoba, le « *History of Science in Science Education Research Group* ».

Cependant, la plupart des publications de ces groupes de recherche sont d'un ordre qu'on pourrait qualifier de justificatif ou de théorique. Soit les auteurs y

présentent les raisons d'utiliser l'histoire des sciences, soit ils analysent les implications d'utiliser l'histoire des sciences dans un cadre constructiviste ou même en fonction de la théorie de Kuhn sur les révolutions scientifiques (Kuhn, 1962). Il existe malheureusement très peu de publications largement reconnues présentant des méthodes concrètes, ayant été expérimentées, pour enseigner les sciences en intégrant l'histoire des sciences. Le faible nombre de recherches menées dans le cadre réel d'un cours de sciences pourrait être dû au fait que les membres des groupes de recherche susmentionnés sont pour la plupart des historiens et des philosophes des sciences. Un décompte de six numéros de *Science & Education* a d'ailleurs montré que, sur 54 auteurs, seulement un auteur était un enseignant pratiquant (Monk 1997).

Faute d'un corpus de références à des études menées en situations réelles d'enseignement, on peut tout de même se référer à l'argumentation théorique justifiant cette introduction. Cette argumentation permet de mieux situer quels bénéfices peuvent être attendus lors de l'utilisation de l'histoire dans l'enseignement des sciences.

Raisons en faveur de l'introduction de l'histoire des sciences dans le curriculum d'un cours scientifique

Dans *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science* (Matthews, 1994), Matthews défend le rôle de l'histoire et de la philosophie des sciences. À l'exception d'un chapitre sur l'épistémologie constructiviste, le livre

de Matthews est un plaidoyer en faveur de l'introduction de l'histoire et de la philosophie des sciences dans les curriculums de cours en science. Matthews apporte les raisons suivantes pour promouvoir l'enseignement de l'histoire des sciences à l'intérieur des cours de sciences (traduit de Matthews, 1994, p.50):

1. *L'histoire favorise une meilleure compréhension des concepts et méthodes scientifiques.*
2. *Une approche historique dans l'enseignement des sciences permet de relier le développement de la pensée individuelle avec le développement des idées scientifiques.*
3. *L'histoire des sciences a une valeur intrinsèque. Les élèves devraient être familiers à tous les épisodes importants de l'histoire des sciences et de la culture.*
4. *L'histoire est nécessaire pour comprendre la nature des sciences.*
5. *L'histoire contrebalance le scientisme et le dogmatisme qui sont largement répandus dans les livres et les cours de science.*
6. *L'histoire, par l'étude des biographies et époques de différents scientifiques, humanise les contenus scientifiques, les rendant moins abstraits et plus engageants pour les élèves.*
7. *L'histoire permet de faire des rapprochements à l'intérieur de sujets et de disciplines scientifiques, et entre des disciplines scientifiques et académiques.*

Les première et deuxième affirmations vont dans le sens de favoriser l'apprentissage des concepts scientifique. On peut les associer à l'argument qui dit que l'étude de l'histoire des sciences favorise le processus de changement conceptuel ou d'évolution conceptuelle.

Les quatrième, cinquième et sixième affirmations peuvent quand à elles être associées à l'argument épistémologique : l'étude de l'histoire des sciences permet de mieux apprécier la nature réelle du développement scientifique. Une mise en garde s'impose toutefois par rapport à cette justification. L'objet des cours de sciences est d'abord et avant tout l'enseignement de concepts scientifiques. En conséquence, l'introduction de l'histoire dans le cadre d'un cours de sciences ne doit pas avoir pour but unique de permettre une meilleure compréhension de la nature des sciences, mais doit promouvoir premièrement l'apprentissage et la compréhension de concepts scientifiques (Monk 1997).

Opposition à l'introduction de l'histoire des sciences dans le curriculum d'un cours scientifique

Les principaux arguments opposés à l'introduction de l'histoire des sciences viennent d'historiens qui voient l'histoire dans les leçons de science soit comme de l'histoire pauvre ou comme de la fabrication de l'histoire pour supporter les idéologies scientifiques actuelles (Matthews, 1994, p. 71). Ces arguments semblent effectivement pertinents si l'on considère que l'unique but de l'utilisation de l'histoire des sciences est de justifier les concepts étudiés. Puisqu'une

justification simple est souvent préférable à une plus compliquée, il va de soi qu'une version simplifiée de l'histoire pourrait être utilisée pour justifier les concepts scientifiques. Cependant, l'apport de cette version simplifiée de l'histoire des sciences se limiterait à la justification des concepts et ne permettrait pas d'atteindre d'autres buts tels que de représenter une image plus réelle de la nature des sciences. D'autre part, il est important de réaliser que l'histoire, qu'elle soit écrite pour son propre enseignement ou pour l'enseignement des sciences, est avant tout une construction basée sur des événements passés. Cette construction ne peut être complète, elle implique toujours des choix et donc un certain niveau de simplification. Il est donc inévitable que l'histoire utilisée dans l'enseignement des sciences soit une simplification, il faut toutefois choisir correctement le niveau de simplification afin de ne pas présenter une fausse image de la science.

2. Mauvaise compréhension de la nature des sciences

Selon les nombreuses recherches associant histoire des sciences et nature des sciences, l'apport de l'histoire des sciences permettrait une meilleure représentation de la nature des sciences (Schwartz, Lederman & Crawford, 2004; Allchin, D., 2003; Galili & Hazan, 2001; Irwin, 2000; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Bybee et al. 1991;). La perspective historique de la science s'opposerait au positivisme et favoriserait une compréhension de la nature humaine des sciences.

Pour bien comprendre le sens de l'affirmation précédente, il importe ici de faire une petite présentation sur les différents courants épistémologiques. Du rationalisme à l'empirisme, il y a plusieurs façons possibles de concevoir la connaissance. L'épistémologie contemporaine est marquée par le passage d'une vision positiviste de la connaissance à une vision constructiviste, ou plutôt à des visions constructivistes ayant plusieurs variantes.

L'image contemporaine de la science qui prévaut dans la société est marquée par l'épistémologie positiviste. Le positivisme structure l'activité scientifique. Non seulement il est à l'origine des divisions que l'on connaît entre les différentes disciplines scientifiques, mais il est aussi à l'origine de l'idée qu'on puisse appliquer une méthode scientifique afin d'analyser la réalité de façon systématique.

Le positivisme postule que les connaissances produites par la science décrivent et expliquent une réalité existante, donc que ces connaissances préexistent à l'activité scientifique. Le positivisme repose aussi sur le postulat que la réalité connaissable possède une détermination interne susceptible d'être connue. Donc que tout effet observable de la réalité a une cause qu'on peut potentiellement identifier.

Les épistémologies constructivistes s'opposent à cette vision des connaissances, elles postulent plutôt que les connaissances produites par la science sont des constructions et non des observations du réel. Les observations sont produites par

l'interprétation qui est faite des perceptions du monde réel. Ainsi l'esprit est actif et construit l'interprétation. De plus, dans l'action de la construction de la connaissance, l'esprit actif construit non seulement la connaissance mais aussi le mode de construction de la connaissance.

Alors que la méthode positiviste est fondée sur la logique déductive (les lois scientifiques s'infèrent par induction et se vérifient par déduction), selon les épistémologies constructivistes, la méthode de la science ne serait pas de chercher à démontrer qu'une raison suffisante permet d'associer une cause à un effet observé, mais reposerait plutôt sur le principe de l'action intelligente : la raison humaine peut construire des connaissances qui peuvent être tenue pour possibles (et non nécessairement vraies). Les connaissances n'auraient donc pas à être démontrées mais devraient plutôt être argumentées : il faudrait ainsi montrer que les connaissances sont à la fois constructibles et reproductibles.

Les épistémologies constructivistes font donc beaucoup plus référence à des facteurs humains dans le processus de développement de la science. En adoptant une position épistémologique constructiviste, on est plus à même d'apprécier l'apport de l'intégration d'une perspective historique en sciences, notamment pour favoriser une compréhension de la nature humaine des sciences, ce qui diffère de l'épistémologie plus positiviste que les cours de sciences tendent à transmettre. On reproche parfois aux cours de sciences du niveau collégial québécois de présenter la recherche scientifique comme un processus de découverte linéaire,

cumulatif et interne (Simard 2002). Linéaire au sens où il s'agirait d'un progrès soutenu où le passé serait garant de l'avenir. Cumulatif au sens où il faudrait voir le développement scientifique comme un ajout incessant de connaissances nouvelles à valeur scientifique de plus en plus étendue. Interne au sens où ce développement s'expliquerait d'abord et avant tout par des facteurs propres à la pratique scientifique elle-même ainsi qu'à sa démarche scientifique. Les produits de la science seraient avant tout des découvertes découlant les unes des autres, le scientifique altruiste aurait pour rôle d'ajouter à ces découvertes et la communauté scientifique intégrerait de façon méthodique et rationnelle les nouveaux savoirs.

Cette vision largement répandue est caractéristique d'une épistémologie positiviste. Or l'épistémologie positiviste a été sérieusement remise en question depuis la publication de *La structure des révolutions scientifiques* de Kuhn (1962) et depuis le développement de l'épistémologie constructiviste. Dans une perspective épistémologique constructiviste modérée, même si les sciences permettent d'expliquer et de prédire des phénomènes naturels, elles demeurent des constructions humaines, des lois scientifiques, des théories et des modèles, acceptés par une communauté scientifique (LeMoigne, 1999). Dans le processus de recherche et d'acceptation lié à ces savoirs, le jeu des membres de la communauté scientifique n'est pas accessoire. Il s'agit d'un processus social qui dépend de dimensions incontournables de l'être humain et de la société dans laquelle il évolue.

Selon les thèses très connues de Kuhn, le processus de développement scientifique serait caractérisé aussi par deux modes de fonctionnement distincts: la science normale et les révolutions scientifiques (Kuhn, 1962). Le premier, la science normale, fonctionne à l'intérieur d'un paradigme. Le but de la science normale n'est pas de faire des avancées scientifiques majeures, mais d'affiner les connaissances. La science normale est linéaire et cumulative. Le second mode de production des connaissances, les révolutions scientifiques, renverse les paradigmes existants et crée de nouveaux paradigmes. C'est le cas par exemple du remplacement du système géocentrique (terre au centre de l'Univers) par le système héliocentrique, ou du passage d'un concept fixe de l'Univers à un concept où l'espace même peut être courbé (selon la relativité générale). Dans ce second mode, le développement scientifique n'est plus du tout linéaire, cumulatif ou interne. Des idées établies sont alors renversées pour être remplacées par de nouveaux concepts. Ce qui était de la science n'en est plus et une science nouvelle émerge. Le processus d'acceptation de cette nouvelle science est évidemment teinté de facteurs humains propres à la fois à la communauté de scientifique et à la société en général².

² Cette affirmation qui peut sembler bien évidente est à l'origine de bien des débats en philosophie des sciences. Le problème est que l'affirmation sous entend que l'acceptation d'une nouvelle théorie n'est pas sujette à des critères absolument objectifs ou dictés par la logique. La conclusion que tirent plusieurs (excluant Kuhn) est que la science ainsi produite ne peut prétendre décrire la réalité.

3. Importance du processus de changement conceptuel dans l'apprentissage des sciences

Dans une perspective constructiviste de la didactique, les apprentissages sont d'abord une reconstruction personnelle que se fait l'apprenant du savoir. Cette reconstruction agit sur les représentations, les conceptions initiales, que se fait l'apprenant des notions scientifiques. Ainsi, l'apprentissage se ferait par une évolution des conceptions de l'apprenant. Différents modèles ont été proposés pour expliquer le fonctionnement de ce changement ou de cette évolution des conceptions.

Une caractéristique importante du changement conceptuel est qu'il est malheureusement souvent très difficile à effectuer de façon permanente :

« Tous les auteurs mettent l'accent sur le fait que les représentations résistent aux efforts d'enseignement et perdurent souvent à travers toute la scolarité. » (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, Toussaint, 1997, p.148).

Cette difficulté peut être due au fait que, dans le quotidien usuel, le pouvoir descriptif, explicatif et prédictif des conceptions initiales suffit amplement. L'approche privilégiée dans l'enseignement des sciences qui consiste en la résolution de problèmes quantitatifs ne favorise pas nécessairement non plus le changement conceptuel (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994; Sequira & Leite,

1991; Viennot, 1979). Des études montrent que même certains élèves universitaires en physique expriment des lacunes importantes au niveau de la compréhension qualitative des concepts, bien qu'ils arrivent à appliquer des développements mathématiques adéquats pour solutionner les problèmes (Ambrose et al., 1998).

4. Parallèle entre le processus de changement conceptuel et l'évolution des concepts en sciences

L'aboutissement du processus de changement conceptuel est une appropriation par l'apprenant de concepts développés et acceptés par une communauté de scientifiques. L'enseignement des sciences devrait donc chercher à favoriser cette appropriation. La présentation de l'histoire des sciences pourrait favoriser cette appropriation en permettant de faire un parallèle entre l'évolution des conceptions chez l'apprenant et l'évolution des concepts dans l'histoire des sciences (Nersessian, 1991).

Les conceptions des élèves ressemblent souvent aux concepts scientifiques historiques (Wandersee, Mintzes & Novak, 1994) et on remarque aussi une similitude entre les deux processus d'évolutions des concepts. Selon Kuhn (1962) l'évolution scientifique se fait de façon inégale et l'histoire des sciences est ponctuée de révolutions scientifiques. L'évolution des concepts chez l'apprenant,

suivant un certain processus de changement conceptuel, s'apparenterait donc aux processus des révolutions scientifiques.

Cependant, selon Monk et Osborne (1997), même si plusieurs chercheurs ont remarqué des correspondances significatives entre les conceptions intuitives et les concepts historiques, il n'y a pas de preuves appuyées par des études détaillées que les conceptions des élèves récapitulent les concepts historiques. C'est-à-dire que bien que les conceptions puissent être similaires aux concepts scientifiques historiques, l'évolution des conceptions ne l'est pas nécessairement. Monk et Osborne remarquent même que tous les chercheurs montrent qu'il y a des différences importantes entre les raisonnements des élèves et l'origine phylogénique des concepts scientifiques. De façon plus nuancée, Sequiera et Leite (1991) s'accordent avec Monk et Osborne et affirment que le développement conceptuel des élèves a quelques similarités avec le développement des concepts qui a eu lieu dans l'histoire des sciences, bien qu'il ne suive pas exactement les mêmes étapes.

Monk et Osborne attribuent ce manque de similitudes entre l'évolution conceptuelle individuelle et l'évolution historique aux différences significatives entre les deux contextes de production des savoirs. Évidemment le contexte de l'apprentissage en classe est différent de celui de la recherche, mais les différences seraient aussi dues à des facteurs sociologiques, métaphysiques et épistémologiques (Nersessian 1991).

Toutefois, bien que les processus d'évolution des conceptions intuitives et des concepts scientifiques présentent des différences, l'enseignement de la séquence historique d'un domaine scientifique a l'avantage de montrer à l'apprenant une séquence d'évolution des conceptions vers les concepts scientifiques actuels (Confrey, 1990). Discuter des conceptions historiques pourrait aussi permettre aux élèves d'explicitier et de réfléchir à leurs propres conceptions et ainsi de prendre conscience des faiblesses ou des problèmes de ces conceptions (Monk & Osborne 1997; Wandersee, Mintzes & Novak, 1994).

Malheureusement, faute de moyens et par une utilisation inadéquate de l'histoire des sciences, on présente rarement l'évolution des concepts scientifiques dans les cours de sciences au niveau collégial québécois. En physique au niveau collégial québécois, le seul sujet qui est abordé par le biais de l'évolution historique des concepts est la théorie quantique. Toutefois, comme la théorie quantique est enseignée habituellement à la toute fin du troisième cours de physique, on n'y accorde souvent peu d'heures de cours et on se limite alors à aborder quelques concepts tel l'effet photoélectrique, le modèle atomique de Bohr et le modèle ondulatoire de de Broglie. De plus, bien que ces concepts historiques soient présentés, leur contexte de développement ne l'est pas. Donc, même s'il est possible que certaines des représentations initiales de l'apprenant correspondent aux concepts enseignés (par exemple les électrons qui tournent autour du noyau comme dans le modèle atomique de Bohr), non seulement on ne peut effectuer de réel parallèle entre une évolution de concepts historiques, mais on ne peut non plus

espérer que cette utilisation de l'histoire puisse avoir un apport quelconque sur la perception que se font les apprenants de la nature des sciences.

De façon générale, on remarque qu'on se limite souvent à une présentation des concepts scientifiques dénuée de leur contexte de développement. Ce faisant, on donne une image positiviste de la science et on se prive d'un outil intéressant pour faciliter le processus d'apprentissage.

5. Approches historiques proposées par certains curriculums scientifiques

L'approche historique a été proposée dans quelques curriculums scientifiques. Ceux-ci sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

Harvard Project Physics Course

L'intérêt pour l'éducation scientifique a connu un essor suite au lancement par les soviétique du premier satellite Sputnik. La société américaine demandait alors des programmes scientifiques plus rigoureux de façon à ce que les futurs scientifiques puissent rivaliser avec le rythme de la recherche scientifique en Union Soviétique. Des efforts ont alors été faits pour humaniser l'éducation des sciences de façon à attirer et motiver une plus grande proportion d'élèves vers leur étude (Brush 1989). En 1962, Holton, Watson et Rutherford proposent alors d'utiliser l'histoire des sciences dans l'enseignement de la physique au niveau secondaire. Cette

proposition a donné naissance au projet bien connu *Harvard Project Physics Course* (Harvard Project physics, 1975). Ce projet est chargé de contenus reliés à l'histoire et à la philosophie des sciences.

Projet 2061

En 1985, année de passage de la comète Halley, l'association américaine pour l'avancement des sciences (AAAS) a fondé le projet 2061, l'année 2061 correspondant au prochain passage de la comète Halley. Le projet 2061 a pour but de stimuler et promouvoir un rehaussement de la qualité de l'éducation scientifique aux États-Unis. Comme il n'y a pas de curriculum scolaire national aux États-Unis, le projet 2061 émet des recommandations, informe et espère influencer les politiques, contenus et philosophies des curriculums.

En 1989, le projet 2061 a publié un rapport intitulé *Science for all Americans*. (AAAS, 1989). Le chapitre 10 de ce rapport est dédié à l'introduction de perspectives historiques dans l'enseignement. Le rapport avance deux types d'arguments en faveur de l'apport d'histoire dans l'enseignement de la science. Le premier est que l'histoire permet d'illustrer par des exemples concrets le fonctionnement de l'entreprise scientifique. Pour bien comprendre cet argument, il faut savoir que le rapport *Science for all Americans* est en faveur de l'enseignement de notions d'épistémologie (au chapitre 1). L'argument précédant est donc que les exemples historiques sont nécessaires pour illustrer et justifier les affirmations épistémologiques. Le second argument est que certains épisodes de

l'histoire de l'entreprise scientifique ont une signification qui se démarque pour l'héritage culturel (AAAS 1989, p.111).

Le curriculum national britannique

En 1988 en Grande-Bretagne, le *National Curriculum Council* a publié le programme d'étude *Science in the National Curriculum* qui recommande d'incorporer une dimension historique à l'enseignement des sciences. Deux sections au début du programme d'étude réfèrent au fait que l'enseignement devrait créer des opportunités à tous les élèves afin qu'ils puissent réfléchir sur l'application de la science et la nature des idées scientifiques. Dans la section sur la nature de la science, le programme d'étude exprime le besoin qu'on offre aux élèves l'opportunité de (Monk 1997):

- développer leur compréhension du processus par lequel les idées scientifiques sont acceptées et rejetées sur la base d'évidences empiriques, et du processus par lequel des controverses scientifiques peuvent survenir lorsqu'il y a différentes façons d'interpréter de telles évidences;
- réfléchir aux façons par lesquelles des idées scientifiques peuvent être affectées par les contextes sociaux et historiques dans lesquels elles sont développées, et comment ces contextes peuvent affecter l'acceptation ou le rejet des idées scientifiques.

6. Approche proposée par le programme québécois des sciences de la nature au collégial

Au Québec, le programme québécois de sciences de la nature (Ministère de l'Éducation du Québec, 1998) dicte les choix faits pour le curriculum des cours de sciences au niveau collégial. Les douze buts généraux du programme viennent préciser sa finalité :

1. appliquer une démarche scientifique ;
2. résoudre des problèmes de façon rigoureuse ;
3. utiliser des technologies appropriées de traitement de l'information ;
4. raisonner avec rigueur ;
5. communiquer de façon claire et précise ;
6. apprendre de façon autonome ;
7. travailler en équipe;
8. établir des liens entre la science, la technologie et l'évolution de la société ;
9. définir son système de valeurs ;
10. situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques ;
11. adopter des attitudes utiles au travail scientifique;
12. traiter de situations nouvelles à partir de ses acquis.

Les buts 8, 9 et 10 sont caractéristiques des curriculums de type science, technologie et société (STS). Ces curriculums incluent les rapports entre la science et la technique, sans oublier leur impact commun sur différents aspects de

la société ou celui de la société sur la science et la technique, lesquels peuvent être analysés sous divers angles, plus ou moins complémentaires. Malheureusement, le programme de sciences de la nature n'est pas très uniforme dans son écriture : bien que les buts 8, 9 et 10 soient d'orientation STS, ils sont contrebalancés par les buts 1, 2 et 3 qui sont d'orientation positiviste. En effet, ces buts concernent la *démarche scientifique*, la *rigueur dans la résolution de problème* et l'*utilisation de technologies appropriées*. Par ces mots, ces buts semblent indiquer une méthode unique, un chemin pavé pour aller du point A au point B dans le processus de développement scientifique. On ne peut à la fois associer le développement scientifique à une démarche rigoureuse, garante du progrès scientifique, et accorder une importance significative au contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques. Les épistémologies constructivistes proposent plutôt qu'il n'y a pas de telle démarche basée sur une logique déductive mais que les connaissances produites doivent être argumentées de façon à démontrer qu'elles peuvent être tenues pour possibles.

Aussi l'explication citée ci-dessous qui est donnée pour le point 10 du programme est bien équivoque si on la met en relation avec le point 8 du programme :

À mesure que se construisent les connaissances scientifiques qui font l'objet des cours de mathématique et de sciences du programme, l'étudiant ou l'étudiante doit apprendre :

- à situer, dans l'histoire du développement de la pensée humaine, l'émergence et l'évolution des concepts enseignés;
- à reconnaître les modes de construction et de transformation des connaissances, lorsqu'elles sont soumises à la discussion et à la validation sous forme d'hypothèses de recherche. (Ministère de l'Éducation du Québec 1998, p.11)

Ce discours ne fait pas référence au contexte de développement des savoirs et illustre une image très positiviste du développement scientifique. Ainsi, alors que le point 8 demande d'établir des liens entre la science, la technologie et la société, le point 10 situe l'évolution des concepts enseignés dans l'histoire du développement de la pensée humaine et non dans l'histoire plus générale de la société. Désautels a d'ailleurs sévèrement critiqué cette ambiguïté du programme :

« L'historicité des technosciences est assimilée au développement d'une pensée décontextualisée, l'évolution des concepts et des idées, indépendante des contingences et des enjeux sociaux qui marquent la production des savoirs scientifiques, et ce n'est que d'une manière vague que l'on fait référence aux discussions et négociations qui ont lieu au sein des communautés scientifiques: «à identifier les modes de construction et de transformation des connaissances, lorsqu'elles sont soumises à la discussion et à la validation sous forme d'hypothèses de recherche» (p. 11). (...) Gageons que, dans ce contexte, on se limitera, comme à l'habitude, à raconter des anecdotes historiques du type de la pomme de Newton. » (Désautels 1999)

On ne peut aussi parler du programme de Sciences de la nature sans mentionner le débat entourant l'approche programme et l'approche par compétence. Le programme des Sciences de la nature préconise le développement de compétences plutôt que l'atteinte d'objectifs et met l'accent sur l'interdisciplinarité. Nous n'entrerons pas dans ce débat, puisque ce n'est pas le propos de cette recherche, mais il est important de le mentionner puisque celui-ci occupe l'avant-scène des discussions sur le programme et que sa simple présence peut occulter les autres enjeux comme par exemple la présentation du contexte d'émergence et de développement des concepts scientifiques.

7. Statut de l'histoire des sciences dans les outils d'enseignement en physique et dans la formation des enseignants

Les manuels de physique les plus utilisés au niveau collégial sont ceux de Benson (2005). D'autres manuels tels Serway (1996) et Halliday, Resnick & Walker (2003) sont aussi disponibles, quoique beaucoup moins utilisés. Ces manuels ont en commun une approche anecdotique de l'histoire des sciences : on y aborde les sujets d'histoire par le biais d'encadrés. Ces passages sont habituellement des simplifications positivistes des développements scientifiques historiques. Ces simplifications des développements scientifiques présentent la physique comme un ensemble de théories cohérentes, découvertes, vérifiées et quasi définitives.

De plus, dans les guides méthodologiques tels celui de Dionne et al. (1998) utilisés pour la rédaction de rapport de laboratoires, on présente la méthode scientifique pour laquelle on utilise l'acronyme OHERIC inventé par André Giordan: observations, hypothèse, expériences, résultats, interprétation, conclusion. Cette présentation logique de la méthode scientifique, associée aussi au positivisme, ne rend pas compte des pratiques effectives de la recherche. Il s'agit plutôt d'une reconstruction a posteriori, laquelle obéit davantage aux besoins de communication de résultats qu'elle ne décrit les modalités de leur établissement (Astolfi 1997, p. 32-33).

Les causes de cette manipulation de l'histoire des sciences pourraient se trouver non seulement dans les manuels et les outils d'enseignement, mais aussi dans la formation des enseignants. Même si le programme du niveau collégial demande aux enseignants de situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques, on ne leur fournit pas pour autant d'outils adéquats pour y arriver et on ne les forme pas en ce sens. En physique, les enseignants sont issus de formations universitaires scientifiques, où il n'est pas question de contexte réel d'émergence et d'élaboration des concepts.

8. Une investigation historique portant sur les modèles de la lumière comme outil pour favoriser le changement conceptuel

Considérant que l'histoire des sciences pourrait avoir un apport positif à l'enseignement des sciences et que cela est même souhaité si l'on se réfère à certains objectifs du programme de Sciences de la nature, la préoccupation principale de cette recherche est de s'intéresser au moyens par lesquels on peut réaliser cette intégration. On propose donc une recherche portant sur une activité d'investigation historique faite à l'intérieur d'un cours de science du niveau collégial.

L'activité proposée porte sur les différents modèles historiques de la lumière. La double nature de la lumière, corpusculaire et ondulatoire, est certainement un concept difficile à saisir. Une étude menée à l'Université de Washington montre par exemple que les étudiants universitaires ayant suivi un premier cours d'introduction en optique ne peuvent souvent déterminer quel modèle utiliser pour analyser une situation donnée (Ambrose et al., 1998). Pour cette raison, il semble que l'étude des développements des modèles de la lumière soit un choix intéressant afin d'évaluer comment une approche historique peut favoriser le changement conceptuel. Le présent projet de recherche propose donc de s'inspirer de l'histoire de l'évolution des différents modèles de la lumière afin de concevoir une activité d'apprentissage qui prend la forme d'une investigation historique.

Cette investigation vise à favoriser l'évolution conceptuelle des élèves de façon à développer une compréhension qualitative des modèles de la lumière de l'optique géométrique, de l'optique ondulatoire et de la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Même si le but premier de cette investigation est de favoriser l'évolution conceptuelle des élèves, il est aussi possible que l'investigation historique puisse aider à mieux présenter la nature du développement scientifique. Cependant, vue la nature relativement courte de cette investigation (quatre périodes de cinquante minutes), il semble peu probable que cette seule intervention ait des effets observables sur l'épistémologie des élèves. En guide de comparaison, pour observer des effets sur l'épistémologie des élèves, Galili et Hazan ont effectué une étude sur une période d'un an complet de cours (Galili, Hazan, 2001). Il paraît donc plus pertinent d'étudier l'effet sur l'évolution des concepts que peut avoir l'investigation historique des modèles de la lumière.

Les erreurs qu'expriment les élèves dans leurs conceptions de la lumière présentent des éléments qu'on retrouve dans les différents modèles de la lumière (Galili, Hazan 2000; Ambrose et al., 1998). Par exemple, les élèves conçoivent que la lumière se déplace suivant des rayons en ligne droite, mais imaginent qu'un observateur peut observer un rayon de lumière qui passe à côté de lui. Ou encore, les élèves conçoivent que la lumière est formée de particules, des photons, mais imaginent que ces particules se déplacent sur des trajectoires sinusoïdales. Ce type

d'erreur de conception nous permet de préciser le but de l'investigation historique et l'objet de la présente étude. L'investigation historique devrait premièrement permettre de constater les ressemblances entre les conceptions des élèves et les différents modèles historiques de la lumière, et deuxièmement, par l'étude de l'évolution des concepts scientifique de la lumière, permettre de mettre en relief les limites d'application des modèles de la lumière. Suivant ce but, la question générale de recherche qu'on peut associer à cette investigation est :

Quels apports l'investigation historique de l'évolution des modèles de la lumière a-t-elle sur les conceptions associées à la nature de la lumière chez les élèves du programme de sciences de la nature au niveau collégial?

Cadre conceptuel

1. Trois points de vue constructivistes en didactique sur l'appropriation des savoirs

Les théories sur le changement conceptuel s'inscrivent dans l'étude de l'appropriation des savoirs : la relation didactique entre l'apprenant et le savoir. Il est intéressant de situer d'abord les points de vue constructivistes sur cette relation.

Comment apprend-t-on? Quels processus entrent en jeu lorsqu'on s'approprie des savoirs et des connaissances? Plusieurs recherches ont été effectuées sur ce sujet et plusieurs modèles ont été formulés. Les pionniers du mouvement constructiviste ont été les premiers à ce poser ce type de questions. En didactique, le point de vue constructiviste s'oppose au point de vue transmissif, il place l'élève au centre de l'apprentissage et postule que celui-ci doit construire de façon active son propre savoir plutôt que d'accepter passivement un savoir transmis par l'enseignant :

« (...) les savoirs ne se transmettent pas ni ne se communiquent pas, à proprement parler; ils doivent toujours être construits ou reconstruits par l'élève qui, seul, apprend. » (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, Toussaint, 1997)

Cependant, le point de vue constructiviste intègre différentes perspectives. Il est fondé à la base sur les perspectives de trois chercheurs principaux : Jean Piaget,

Gaston Bachelard et Lev Semenovitch Vygotski (Astolfi, Develay, 2002). On attribue généralement à Piaget le rôle de père du *constructivisme* alors que les travaux de Bachelard sont associés au concept *d'obstacle épistémologique* et que Vygotski est vu comme à l'origine du *socio-constructivisme*. Les points de vue de ces trois chercheurs sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

Le point de vue de Piaget

Piaget a initié le constructivisme par ses travaux sur l'épistémologie génétique. Piaget développe l'idée que l'enfant apprend en construisant lui-même ses propres instruments de connaissances, ses *schèmes*. L'évolution des schèmes est liée aux *déséquilibres* que provoquent les interactions de l'enfant avec l'expérience et le milieu, et surtout aux « *rééquilibrations majorantes* » qui peuvent s'ensuivre (Astolfi, 1997, p.47). Cette évolution est aussi étroitement liée au développement biologique du cerveau de l'enfant. Le développement biologique serait nécessaire et préalable à l'évolution des schèmes.

Pour Piaget, lorsque l'enfant grandit, il accède progressivement à des stades du développement. Ces stades du développement correspondent à des organisations successives de la « représentation du monde » chez l'enfant et l'adolescent (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, Toussaint, 1997). L'accès à un nouveau stade se fera par un processus *d'assimilation-accommodation*. Ce processus entre en jeu lorsque l'enfant, lors de son dialogue avec les objets, rencontre la « résistance du réel » et de cette résistance résulte un déséquilibre dans la structure cognitive

(composée de schèmes). Ce déséquilibre correspond à une perturbation, appelée conflit cognitif, entre la structure mentale actuelle de l'enfant et les éléments qui lui sont hétérogènes.

En réponse au déséquilibre, l'enfant va par des compensations actives, autoréguler son activité cognitive, afin d'arriver à une équilibration. Dans les cas favorables, les équilibres se rétablissent sur une base plus large, il s'ensuit une réélaboration de la structure interne, une rééquilibration majorante, qui débouche sur un palier supérieur d'équilibre : un nouveau stade du développement.

Le point de vue de Bachelard

Bachelard d'autre part estime que c'est en termes d'*obstacles épistémologiques* qu'il faut poser le problème de la connaissance. Pour Bachelard, la construction du savoir scientifique est irrégulière car elle doit se faire contre des obstacles épistémologiques. Ces obstacles sont issus du sens commun où l'esprit a le réflexe de se réfugier trop facilement. Ainsi, la connaissance scientifique ne s'établit que par une rupture épistémologique avec l'expérience première et la pensée commune. L'obstacle épistémologique est la difficulté à se dégager d'une conception initiale afin d'accepter une nouvelle conception plus scientifique, plus universelle.

On associe aussi ces obstacles à des conceptions spontanées. Ces conceptions spontanées sont non scientifiques au sens où elles sont en désaccord avec le savoir

scientifique. Ces conceptions doivent être prises en compte dans l'enseignement pour comprendre les difficultés des élèves :

« À défaut de prise en compte didactique de telles conceptions, dont on a vu qu'elles sont structurées de façon sous-jacente par des obstacles épistémologiques, celles-ci viennent « cohabiter » avec des savoirs scolaires qui restent des acquis superficiels. Ils sont mobilisés chaque fois que le métier d'élève incite à les mettre en relation avec le problème ou l'activité, mais les représentations resurgissent inchangées, souvent dans des contextes plus simples qui n'apparaissent pas comme liés à l'usage des concepts disciplinaires. »
(Astolfi, 1997, p. 73)

Le point de vue Vygotski ou le socio-constructivisme

Les points de vue constructivistes de Piaget et de Bachelard sont qualifiés de psychologiques parce qu'ils considèrent l'apprentissage comme un processus de construction intellectuelle, personnelle et individuelle. Une autre tendance issue des travaux de Vygotski, le *socio-constructivisme*, insiste sur le rôle décisif des transmissions sociales et sur l'importance de la médiation entre pairs. En opposition à Piaget, l'auteur russe, considère que la première forme de pensée est tournée vers l'extérieur. L'enfant se construit grâce aux relations avec les adultes et l'apprentissage précède le développement.

Pour Vygotski, le travail didactique consiste à devancer, sans forcer à l'excès, la maturation des structures cognitives des élèves. Il s'oppose ainsi à Piaget, pour lequel l'accès à un stade de développement précède l'apprentissage. Pour Vygotski, l'apprentissage précède le développement. Vygotski montre aussi que le mouvement fondamental de la pensée va du collectif vers l'individuel (en opposition à la notion d'égoцентризм enfantin de Piaget).

Vygotski caractérise le sujet non seulement par son niveau de développement actuel (le stade de développement de Piaget, défini par ce que l'enfant est capable de réussir seul aujourd'hui), mais aussi par le niveau de développement potentiel, supérieur au précédent (défini par ce que le sujet est déjà capable de faire en collaboration, et réussira seul demain). Vygotski nomme l'écart entre les deux niveaux la « zone proximale » : la zone optimale qui permet une plus grande sensibilité à l'apprentissage. C'est dans cette zone que la stimulation intellectuelle de l'éducateur est plus efficace.

2. Le processus de changement conceptuel

Les points de vue de Piaget et de Bachelard Piaget ont en commun de supposer des représentations initiales ou conceptions alternatives³. D'une part, Piaget nous dit que, pour qu'il y ait apprentissage, il doit y avoir un déséquilibre cognitif suivi

³ Selon les auteurs, les représentations initiales seront nommées préconceptions, conceptions initiales, conceptions alternatives, conceptions primitives, fausses conceptions, etc,

d'une rééquilibration. Or ce déséquilibre nous oblige à présumer de l'existence de représentations initiales. D'autre part, les travaux de Bachelard nous indiquent l'importance des obstacles épistémologiques dans l'apprentissage. Ces obstacles épistémologiques sont issus du sens commun où l'esprit a le réflexe de se réfugier trop facilement et donc s'assimilent aussi à une difficulté de se dégager d'une représentation initiale.

Ce déséquilibre cognitif de Piaget suivi d'une rééquilibration et cette difficulté de Bachelard à se dégager d'un obstacle épistémologique ont mené au développement de l'idée que l'apprentissage implique un changement conceptuel. L'apprentissage n'est donc pas un processus additif qui résulte de l'accumulation et la juxtaposition de nouveaux savoirs à des savoirs antérieurement acquis. L'apprentissage résulte plutôt de la modification plus ou moins importante de connaissances antérieures ou de conceptions initiales.

Les recherches sur les conceptions initiales des apprenants partent du point de vue piagétien qu'il existe des structures sous-jacentes (les schèmes de Piaget), mais, sans s'opposer à l'existence de ces structures, s'attardent davantage aux idées des apprenants. Ces recherches ont permis de démontrer de façon empirique certaines caractéristiques des conceptions initiales (Viennot, 1979; Confrey, 1990; Duit, 1991; Wandersee, Mintzes & Novak, 1994) :

- Les conceptions initiales ne sont pas de simples erreurs. Elles servent de systèmes d'explications dans de nombreuses situations et peuvent s'avérer fonctionnelles pour la compréhension de certains phénomènes et efficaces pour la résolution de certains problèmes.
- L'efficacité des conceptions initiales se traduit en une difficulté à les modifier. L'enseignement ne produit pas nécessairement un changement de conceptions et il arrive que les conceptions initiales coexistent avec les modèles enseignés. Les modèles enseignés sont alors mobilisés dans les situations scolaires alors que les conceptions initiales servent à appréhender les situations connues et nouvelles.
- En situation d'apprentissage, les conceptions initiales interfèrent avec les concepts scientifiques enseignés. Le processus de changement conceptuel est en conséquence marqué d'obstacles et de difficultés à surmonter.

Depuis une trentaine d'années, le processus de changement conceptuel qui permet la transition entre les conceptions initiales et les concepts scientifiques est l'objet d'un champ de recherches très fertile. Ces recherches ont mené à plusieurs modèles ou stratégies pour favoriser le changement conceptuel. Afin de présenter un portrait d'ensemble de ce champ de recherche, il est intéressant de revoir en ordre chronologique les plus importants de ces modèles. Une telle présentation du champ de recherche sur le changement conceptuel se retrouve dans plusieurs thèses et mémoires et n'est pas unique au présent document. On peut citer entre autres la thèse de Patrice Potvin (2002) et le mémoire de Steve Masson (2005).

Ces deux recherches font partie des sources documentaires utilisées pour la section sur le processus de changement conceptuel qui suit et ont influencé la structure de cette section.

Les modèles et stratégies proposées pour favoriser le changement conceptuel sont caractérisé par deux perspectives, la première mettant l'accent sur la rupture conceptuelle entre les conceptions initiales et les concepts scientifiques, la seconde insistant sur l'existence inévitable d'une continuité entre les conceptions initiales et les conceptions construites.

Avant de présenter quelques modèles de changement conceptuels, il convient de préciser un paradoxe de l'apprentissage dans un cadre constructiviste qui est à l'origine des deux perspectives du changement conceptuel : la rupture et la continuité sont deux aspects de l'apprentissage qui entrent en jeu dans toute construction de savoir. La construction de connaissances ne serait possible sans un lien entre connaissances antérieures et connaissances nouvelles. Les structures de connaissances existantes peuvent se transformer en structures de connaissances plus complexes, ce qui suppose une part de conservation des acquis antérieurs et une part de constructions nouvelles (Piaget, 1975). Par opposition à une pédagogie de la transmission, où on ferait abstraction des connaissances antérieures de l'apprenant, dans une perspective constructiviste de l'apprentissage les structures de connaissances construites doivent prendre appui sur les structures de connaissances antérieures. Inversement, les structures de connaissances

construites ne sauraient prendre appui sur des connaissances antérieures qui leur sont hétérogènes ou incompatibles. C'est là que se pose le problème du changement conceptuel. Ce changement implique une rupture, ou une déconstruction, des connaissances antérieures, et une construction de conceptions nouvelles. Cette construction devra avoir un lien avec ou prendre appui sur les connaissances antérieures de l'apprenant. Les différentes approches du changement conceptuel diffèrent par l'orientation qu'elles prennent par rapport à ces aspects de rupture et de continuité, et par l'accent qu'elles mettent soit sur le point d'appui des nouvelles conceptions, soit sur les sources d'obstacles à surmonter.

La perspective de la rupture

Le modèle de Nussbaum et Novick

Au début des années 1980, Nussbaum et Novick (1982) proposent un modèle où le changement conceptuel serait provoqué par la confrontation avec un *événement-anomalie*. Nussbaum et Novick (1982) développent une séquence d'enseignement qui s'inspire du processus d'assimilation-accommodation de Piaget et qui comporte trois étapes principales :

1. Découvrir tout d'abord les conceptions initiales des élèves par leurs réactions à un événement révélateur et par la prise de conscience de l'élève de leurs structures mentales et de celles des autres élèves.

2. Créer un déséquilibre, un conflit conceptuel, en tentant d'expliquer un *événement-anomalie* que les conceptions mises en évidence précédemment seront incapables de cerner.
3. Encourager et aider l'accommodation cognitive.

La première étape du processus propose de rendre explicites et de partager ses conceptions initiales. Il est essentiel que les conceptions initiales soient rendues explicites afin qu'ensuite le conflit avec l'événement-anomalie soit évident. La troisième étape, celle de l'accommodation cognitive, se fait en groupe et le professeur y joue un rôle de médiateur. Le terme choisi, *accommodation*, est très révélateur de l'influence piagétienne.

Cette séquence a servi de base pour enseigner à des élèves âgés de 11 à 13 ans des aspects de la structure des gaz (entre autres les notions de vide entre les particules et de mouvement des particules). L'événement révélateur utilisé par les auteurs est une situation imaginaire comportant un ballon de verre duquel on a pompé la moitié du contenu initial. Les élèves prennent conscience de leurs conceptions initiales en dessinant la distribution de l'air dans ce ballon et en discutant de leurs hypothèses. L'événement-anomalie est une situation inverse : un ballon de verre dans lequel on a ajouté de l'air. Il s'en suit un débat qui encourage l'accommodation cognitive. L'issue de l'activité est la meilleure conception du point de vue des élèves.

Nussbaum et Novick s'opposent aussi dans leur recherche à l'idée que l'évolution des conceptions des apprenants puisse suivre le même cheminement que celui des concepts scientifiques et procéder, comme celui-ci par révolutions. Ils commentent cette idée en suggérant :

"Un changement conceptuel majeur ne s'opère pas (...) par la révolution, car il est par nature un processus évolutif". (Nussbaum , Novick , 1982)

Cependant, on peut voir dans cette affirmation de Nussbaum et Novick une certaine contradiction avec le modèle qu'ils proposent. Celui-ci procède par déséquilibre suivi d'accommodation cognitive. Ce processus s'apparente davantage à celui d'une révolution qu'à celui d'une évolution.

Le modèle de Posner et al.

Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) ont proposé un modèle légèrement différent de celui de Nussbaum et Novick. Les deux modèles se ressemblent car ils procèdent tous deux par étapes d'identification des conceptions initiales suivies de ruptures avec celles-ci. Par contre, alors que le modèle de Nussbaum et Novick repose principalement sur les recherches sur les conceptions initiales des apprenants, le modèle de Posner et al. repose aussi et premièrement sur les philosophies des sciences de Kuhn, de Lakatos et de Toulmin qui affirment que la science n'évolue pas selon un processus linéaire et cumulatif, mais plutôt de façon

irrégulière. Le modèle de Posner et al. est aussi différent de celui de Nussbaum et Novick car il est centré sur l'individu, alors que le modèle de Nussbaum et Novick utilise les interactions sociales entre les individus. Finalement, les modèles sont différents car alors que Nussbaum et Novick suggèrent que les individus développent de meilleures conceptions par processus d'accommodation cognitive, Posner et al. suggèrent plutôt que les individus peuvent adhérer à une conception plus scientifique si certaines conditions sont respectées.

Bien que les philosophies de Kuhn, Lakatos et Toulmin, soient différentes sur plusieurs points, le paradigme de Kuhn, le programme de recherche de Lakatos et le changement conceptuel de Toulmin possèdent des caractéristiques très similaires. Les thèses de Kuhn, qui ont déjà été présentées au chapitre précédent (voir le point 4 du chapitre 1), sont basées sur des épisodes de science normale ponctués de révolutions scientifiques. Cette philosophie des sciences sert de fondement théorique au modèle de changement conceptuel présenté par Posner et al.

De façon analogue à Kuhn qui avance l'idée des révolutions scientifiques, Posner et Al. (1982) suggèrent qu'à certains moments une rupture avec les connaissances antérieures est nécessaire afin d'acquérir de nouvelles connaissances. Afin d'arriver à cette rupture, l'apprenant doit d'abord passer par un stade de *conflit cognitif* qui permet une remise en question des structures conceptuelles existantes. L'intervention pédagogique recommandée pour l'enseignant consiste

principalement à créer ce conflit cognitif chez les apprenants. Il s'agit d'abord d'inviter les apprenants à exprimer leurs conceptions par rapport à un phénomène donné puis de leur présenter une démonstration opposée à leurs conceptions. Le conflit cognitif résultant provoque alors de l'insatisfaction et engendre le processus de changement conceptuel.

Le conflit cognitif correspond donc à une condition sine qua none au changement conceptuel. Outre l'insatisfaction face à sa conception initiale (conflit cognitif), Posner et al. identifient trois autres conditions qui permettent ainsi le passage d'une conception alternative à une conception scientifique (Posner & al., 1982, p.214) : l'individu doit comprendre la nouvelle conception proposée, il doit trouver celle-ci plausible et enfin il doit considérer que la nouvelle conception est fructueuse et susceptible d'enrichir ses connaissances. Ces quatre conditions énoncées par Posner et Al. seront reprises dans plusieurs autres modèles de changement conceptuels et ont certainement contribué grandement à la notoriété du modèle de Posner et Al.

Les conditions de Posner et al. supposent que l'apprenant possède une certaine *écologie conceptuelle*. Cette écologie est constituée de l'ensemble des concepts auxquels adhère l'individu. Les conceptions initiales de l'individu sont donc issues de son écologie conceptuelle, mais l'écologie conceptuelle a aussi et surtout un rôle central dans la sélection de nouveaux concepts. C'est en se référant à son écologie conceptuelle que l'individu perçoit l'intelligibilité d'un nouveau concept,

qu'il trouve ce concept plausible ou non, et qu'il peut voir au-delà de ce concept les possibilités que celui-ci offre afin de rechercher de nouvelles connaissances. L'écologie conceptuelle gouverne donc en ce sens le processus de changement conceptuel.

Le modèle de Hewson

Hewson et Thorley (1989), s'inspirant du modèle de Posner et al. (1982), précisent quant à eux qu'au cours du processus de changement conceptuel, la conception initiale, considérée comme pertinente au départ, perd progressivement son statut pour être remplacée par une conception plus semblable à celle des scientifiques. Cette perte de statut de la conception initiale se fera par comparaison avec les concepts scientifiques. Hewson et Thorley suggèrent de confronter les élèves à la disparité de leurs propres conceptions par rapport aux concepts scientifiques afin de favoriser un dépassement de la connaissance intuitive dans la direction de la connaissance experte ou savante. Cette confrontation résulte en une comparaison basée sur les critères des quatre conditions identifiées par Posner et al. :

- la satisfaction de l'individu par rapport à la conception,
- l'intelligibilité de la conception,
- la plausibilité de la conception,
- le potentiel de la conception d'enrichir les connaissances de l'individu.

Le changement conceptuel s'opère lorsque le concept scientifique répond mieux à ces quatre critères que la conception initiale. Le modèle de Hewson diffère donc de celui de Posner et al. en ce qu'il accorde une plus grande importance aux conceptions initiales. Il ne suffit plus par un conflit cognitif (première condition de Posner et al.) de discréditer les conceptions initiales. Celles-ci doivent plutôt être soumises aux mêmes conditions que la conception enseignée et ce n'est que lorsque la conception enseignée répond mieux aux conditions que le changement conceptuel est susceptible de se produire.

Notons que les modèles de Hewson et Posner et al. ont toutefois en commun qu'ils proposent d'adhérer à un concept scientifique, plutôt que de laisser les apprenants développer une nouvelle conception par un processus d'accommodation cognitive comme dans le modèle de Nussbaum et Novick.

Le modèle du dérangement épistémologique de Larochelle et Désautels

Pour Larochelle et Désautels, savoir commun et savoir savant ne reposent pas sur les mêmes postulats épistémologiques et ne poursuivent pas les mêmes finalités. Bien qu'ils soient également respectables, ils sont néanmoins animés par des logiques différentes. Un changement de conception implique donc une certaine forme de dérangement épistémologique, c'est-à-dire une remise en question des postulats épistémologiques implicites à la base des représentations intuitives construites par l'apprenant (Larochelle, 1992).

Partant du problème que des conceptions spontanées de l'enfance ont tendance à perdurer chez les étudiants malgré un enseignement scientifique, Larochelle et Désautels défendent l'hypothèse que cette persistance des conceptions spontanées est imputable à une attitude cognitive passive des étudiants face à l'apprentissage de la science et à une absence d'esprit critique face à la science. Cette attitude serait tributaire de la façon dont on présente la science aux élèves et de l'image dogmatique qu'ils s'en font. Les travaux antérieurs de Larochelle et Désautels démontrent que les étudiants perçoivent la recherche scientifique comme un processus de découverte linéaire d'une réalité de nature ontologique.

Larochelle et Désautels ont établi une stratégie qu'ils intitulent *stratégie du dérangement épistémologique* (Larochelle, 1992, p. 73) et qui a pour but de modifier cette perception erronée du développement scientifique. Larochelle et Désautels ont mis en pratique cette stratégie en proposant à un groupe d'étudiants de simuler un processus de recherche scientifique. Le processus de recherche repose sur un problème fictif créé par simulation informatique. La simulation informatique produit des résultats (des trajectoires suivie par des entités inconnues) à partir de données initiales qui lui sont fournies. Les étudiants doivent, en équipe, développer un modèle scientifique pour expliquer et prédire les résultats obtenus avec la simulation informatique. Comme plusieurs équipes se penchent sur le même problème, il peut y avoir un débat scientifique autour du problème. Pour rendre plus réel le processus de recherche scientifique, Larochelle et

Désautels utilisent plusieurs outils : cahier de laboratoire, journal de recherche, colloque, journal personnel.

Larochelle et Désautels ont testé cette stratégie dans un cours de philosophie de niveau collégial. Ils ont étudié qualitativement les réflexions des étudiants et ont conclu que cette stratégie s'avère efficace :

« En l'occurrence, ces quelques rappels des réflexions des étudiants illustrent bien, selon nous, que ceux-ci ont non seulement fabriqué des problèmes et parcouru des chemins diversifiés dans leurs explorations conceptuelles, mais ils ont aussi développé, ce faisant, une capacité réflexive peu commune (Larochelle, Désautels, 1992, p.221). »

L'étude de Larochelle et Désautels est basée sur une simulation informatique dans laquelle une entité inconnue entre d'un côté d'un carré et en ressort par un autre, à suivant une trajectoire différente. Cette simulation illustre bien le fonctionnement de la science tel que vu par le constructivisme radical : on ne peut connaître l'objet de la science, on ne peut que comparer les conceptions que l'on se fait aux résultats d'expériences.

Dans ce cadre, par des itérations successives de la simulation, les étudiants sont effectivement arrivés à développer des conceptions qu'ils ont été appelés à remettre en question, celles-ci n'étant plus viables dans une itération ultérieure de

la simulation. Il apparaît donc raisonnable de conclure que le constructivisme radical décrit bien le fonctionnement de la production de savoir et de l'apprentissage dans le cadre de l'étude de Larochelle et Désautels.

Il faut cependant remarquer certaines différences contextuelles entre l'étude de Larochelle et Désautels et un véritable contexte de production et d'apprentissage de savoirs. Ces différences originent premièrement du but poursuivi par Larochelle et Désautels. L'utilisation d'un problème fictif, une simulation informatique, semble appropriée pour ce but. Celui-ci n'étant pas de faire apprendre un concept scientifique aux étudiants, mais plutôt de faire réaliser aux étudiants les différents *contextes de significations* qui particularisent les savoirs et ainsi de favoriser la réflexion et la pensée critique chez les étudiants. Ce problème fictif a l'avantage de bien représenter l'idée qu'on ne peut aspirer à connaître réellement la réalité ontologique de ce qu'il y a à l'intérieur de la simulation et d'inciter de cette façon les étudiants à développer un esprit critique face à la science.

Par contre, ce choix d'un problème fictif devient un désavantage lorsqu'on veut utiliser les conclusions de l'étude pour concevoir un enseignement qui favorise un processus de construction de savoirs généralement acceptés par la communauté scientifique. Si le but poursuivi est de permettre aux étudiants de reconstruire pour eux-mêmes des savoirs, peut-on considérer que leur construction de savoir sera favorisée en leur présentant le postulat que leurs conceptions ne sont pas un

modèle de la réalité mais ne sont que des concepts valables en fonction des informations que l'on a sur la réalité ? Aussi, dans le cas de la simulation, une entité inconnue entre et sort d'une boîte et il est clair qu'on ne peut savoir ce qu'il y a à l'intérieur. Est-ce un reflet réel de la science ? Ces questions nous incitent à une certaine retenue face au constructivisme radical et au modèle du dérangement épistémologique.

Les expériences centrées sur le conflit sociocognitif

Dans la suite des travaux de Vygotski, Willem Doise, Gabriel Mugny et Anne-Nelly Perret-Clermont, ont introduit le concept de conflit sociocognitif (Astolfi et al., 1997). Le conflit sociocognitif diffère du conflit cognitif en ce qu'il est déclenché par l'interaction, l'échange et l'argumentation avec des pairs. Les conflits sociocognitifs surviennent dans un groupe lorsque deux ou plusieurs élèves réalisent que leurs conceptions sont incompatibles.

Sans le dire explicitement, certains modèles du changement conceptuel ont en commun qu'ils proposent de susciter un conflit d'origine social pour favoriser processus de changement conceptuel. On peut penser aux modèles de Nussbaum et Novick, au modèle du dérangement épistémologique ou au modèle allostérique. On peut même aussi penser au modèle révisé de Strike et Posner : dix ans après la publication de leur modèle initial de changement conceptuel (Posner et al. 1982), Strike et Posner ont révisé ce modèle (Strike, Posner, 1992) . Alors que le modèle initial mettait l'accent sur les aspects rationnels de l'apprentissage, le modèle

révisé reconnaît l'influence des aspects affectifs, motivationnels et sociaux sur le processus de changement conceptuel.

Cependant, les tenants du socioconstructivisme vont plus loin et accordent au conflit sociocognitif un rôle central dans le processus de changement conceptuel. Les modèles socioconstructivistes proposent de mettre les apprenants en situation d'explorer les représentations qu'ils possèdent. Puis, le groupe essaie de parvenir au concept scientifique par un travail sur ces représentations. On mise sur l'interaction sociale pour arriver à une évolution des conceptions. Les conceptions initiales des apprenants servent à bâtir collectivement un savoir construit et sanctionné par les discussions entre les apprenants.

L'utilisation du conflit socio-cognitif a donné des résultats positifs dans les études expérimentales de Perret-Clermont, Mugny et Doise (Astolfi et al, 1997, p.39). Toutefois, l'utilisation du conflit socio-cognitif pour faire évoluer les conceptions incite à certaines réserves.

La première est associée à la praticabilité d'une stratégie d'apprentissage qui accorderait une importance centrale au conflit socio-cognitif. Dans les études expérimentales qui ont été faites sur l'effet du conflit socio-cognitif, les auteurs utilisent une technique de prétest individuel de façon à caractériser les conceptions des sujets. Les situations choisies pour les études expérimentales facilitent cette caractérisation car elle permet un classement des conceptions initiales en

catégories simples. Les auteurs forment ensuite des équipes en s'assurant que les conceptions des membres des équipes sont hétérogènes. Dans un contexte réel d'enseignement, de telles méthodes serait extrêmement difficiles à appliquer, particulièrement au niveau collégial. La complexité des concepts étudiés en sciences fait qu'il y aurait une multitude de conceptions au prétest et la formation d'équipes serait un casse-tête insolvable.

La seconde réserve est qu'il n'y a aucun mécanisme qui contrôle le savoir construit par les apprenants. Un tel mécanisme serait nécessaire afin de s'assurer que les apprenants arriveront à construire un savoir quelconque et que celui-ci sera conforme aux concepts scientifiques. Ce problème a d'ailleurs été formulé par Astolfi et Al. :

« De plus, dire que le conflit socio-cognitif peut jouer un rôle dans les apprentissages scolaires, notamment pour déstabiliser les représentations des élèves, ne signifie pas qu'il puisse, à lui seul, suffire à la reconstruction d'un nouveau paradigme. Il est clair d'abord que l'apport d'informations nouvelles est souvent indispensable. Il ne faut pas sous-estimer non plus l'importance de phases de reconstruction, qui doivent intégrer d'autres apports – des propositions de modèles par l'enseignant par exemple -, tout en bénéficiant de la dynamique engendrée par les interactions socio-cognitives. »

(Astolfi et al. 1997, p. 47)

Dans le cadre de l'enseignement des sciences au niveau collégial, l'élève devrait développer une certaine compétence avec les concepts scientifiques. On ne peut se permettre une dérive contre productive où les élèves développeraient des conceptions qui s'éloigneraient des concepts scientifiques à enseigner. Un mécanisme de contrôle est donc nécessaire.

La perspective de la continuité

Le modèle de Vosniadou

Le modèle de Posner et *al.*(1982) a été remis en question par plusieurs chercheurs qui remarquent que les conceptions initiales sont robustes, ancrées et résistent souvent au conflit cognitif (Duit 1999). Selon Vosniadou (1994), l'apprenant possède un cadre théorique naïf, établi dès la jeune enfance, sous-jacent aux conceptions initiales. Ce cadre théorique forme la base de l'ontologie et de l'épistémologie auxquelles adhère l'individu. Les conceptions initiales seraient résistantes au conflit cognitif lorsque les conceptions enseignées ne peuvent être assimilées dans le cadre théorique de l'apprenant parce qu'elles sont contradictoires à celui-ci.

Au lieu de s'attarder aux conceptions elles-mêmes, selon Vosniadou l'étude des processus de changement conceptuel devrait donc s'attarder davantage au cadre théorique dans lequel s'inscrivent les conceptions de l'apprenant. L'enseignement devrait viser premièrement à déconstruire le cadre théorique de l'apprenant sans

quoi l'apprenant continuera à adhérer aux conceptions qui sont cohérentes avec son cadre théorique.

Le modèle de diSessa

En 1993, diSessa propose une interprétation différente des processus de changement conceptuel (diSessa 1993). Cette interprétation est basée sur l'idée que les apprenants ne possèdent pas de conceptions alternatives bien développées qui seraient remplacées lors d'un apprentissage. Le modèle de diSessa soutient l'hypothèse que des habitudes interprétatives seraient plutôt à l'origine de conceptions que se font spontanément les apprenants. Il y aurait un nombre restreint de ces habitudes interprétatives. L'apprentissage de concepts scientifiques se ferait par l'identification et l'activation des bonnes habitudes interprétatives. Il n'y aurait donc pas de rupture conceptuelle mais une plutôt une continuité, où un ensemble restreint d'habitudes interprétatives serait à la base de la construction des concepts scientifiques. L'enseignement devrait alors favoriser un changement dans l'utilisation ou la sélection des habitudes interprétatives.

Le modèle allostérique de Giordan et Vecchi

On ne peut situer le modèle allostérique de Giordan et Vecchi ni dans la perspective de la rupture, ni dans celle de la continuité. Giordan situe le paradoxe de l'apprentissage ainsi :

« L'acquisition de nouveaux savoir se situe tout à la fois dans le prolongement de savoirs antérieurs qui fournissent le cadre de questionnement et les éléments de référence pour décoder les données nouvelles, et par rupture à ceux-ci, ou du moins par détour, l'élaboration d'un concept étant la résultante d'une structuration autre des divers éléments cognitifs en réponse à un questionnement. » (Giordan, 1989, p. 250)

Pour Giordan, l'apprenant utilise ses propres conceptions pour décoder l'information qu'il peut se procurer et élabore ainsi son savoir. Ainsi, les conceptions sont le point de départ de l'apprentissage, le résultat de l'apprentissage et l'instrument de l'apprentissage. Dans le processus d'apprentissage, les constructions se remodelent constamment. Cette vision de l'apprentissage n'est pas sans rappeler l'hypothèse phénoménologique des épistémologies constructivistes qui postulent que de la construction de la connaissance, l'esprit actif, le sujet connaissant, construit non seulement la connaissance mais aussi le mode de construction de la connaissance (Le Moigne, 1999). Ainsi on peut voir un parallèle entre l'évolution des concepts scientifiques et l'évolution des conceptions des apprenants :

- les concepts scientifiques permettent l'interprétation des perceptions du réel (l'observation) et cette interprétation modifie les concepts scientifiques,

- de façon analogue, les conceptions permettent l'interprétation de l'information que l'individu se procure et cette interprétation modifie les conceptions de l'individu.

Cette action sur elles-mêmes des conceptions est d'ailleurs à l'origine du qualificatif « allostérique » attribué au modèle. Giordan fait par ce terme une métaphore avec la structure et le fonctionnement de certaines protéines dites « allostériques ». Ces molécules enzymatiques, fondamentales pour la vie, changent de forme, et donc de fonction, suivant les conditions de l'environnement dans lequel elles se trouvent.

Outre l'idée que les conceptions agissent sur elles-mêmes, Giordan et Vecchi identifient d'autres caractéristiques fondamentales au modèle d'apprentissage allostérique :

1. L'accent doit être mis sur les interrelations qui existent entre les concepts. Les apprentissages conceptuels sont caractérisés par des relations multiples entre plusieurs organisations qui peuvent être abordées sous différents angles. Ces apprentissages ne peuvent être réduits à un apprentissage de données isolées.
2. Il faut une déformation intellectuelle qui se traduit, le plus souvent, par une transformation radicale du réseau cognitif. Comme une nouvelle conception ne s'inscrit pas directement dans la ligne des connaissances antérieures, les

conceptions ne doivent pas seulement construire de façon additive sur elles-mêmes, mais doivent aussi se déformer.

3. Il faut que l'apprenant concilie les nouvelles connaissances afin de constituer un nouveau savoir. Il doit repérer les ressemblances et les différences entre les anciennes connaissances et les nouvelles et résoudre les contradictions.

Giordan répertorie aussi un certain nombre de paramètres heuristiques qui caractérisent les éléments que l'enseignant pourrait proposer à l'apprenant pour créer un environnement didactique susceptible d'interférer avec son système de pensée et lui permettre son dépassement. Selon ces paramètres, l'enseignant devrait :

1. Induire une série de déséquilibres conceptuels pertinents afin d'aider l'apprenant à élaborer une conception et afin de le motiver par rapport à la question à traiter.
2. Par un certain nombre de confrontations authentiques (confrontation élève-réalité, confrontation élève-élève, confrontation élève-information, confrontation élève-maître) :
 - convaincre l'apprenant que ses conceptions ne sont pas adéquates par rapport au problème traité,

- amener l'apprenant à recueillir un ensemble de données pour enrichir son expérience,
 - entraîner l'apprenant à reformuler le problème et envisager d'autres relations.
3. Aider l'apprenant en s'assurant qu'il a accès à un certain formalisme pour organiser les nouvelles données, ou comme point d'ancrage pour produire la nouvelle structuration du savoir.
4. Procurer des situations où l'apprenant pourra mobiliser son nouveau savoir pour en tester l'opérationnalité et les limites.

3. Méthodes d'apprentissage basées sur le travail en équipe

Tout enseignement ou activité d'apprentissage repose sur une méthode d'enseignement ou d'apprentissage. Même lorsqu'un cours, qu'on pourrait qualifier de traditionnel, se résume à un exposé unidirectionnel de la matière par l'enseignant, il demeure tout de même que ce cours est basé sur une méthode d'enseignement magistral. La conception d'une activité d'investigation historique repose aussi à la base sur certains choix relatifs à la méthode d'enseignement ou d'apprentissage. Or, les points de vue constructivistes en didactique et les recherches sur le processus de changement conceptuel nous indiquent que

l'enseignement magistral ne favoriserait pas la reconstruction par l'apprenant des savoirs enseignés, car l'enseignement magistral place l'apprenant dans une situation passive où les savoirs lui sont transmis. En conséquence, il a été choisi que l'activité d'investigation historique développée pour cette recherche implique un travail d'équipe.

Bien qu'elles demeurent des méthodes d'enseignement relativement marginales, des méthodes d'apprentissages basées sur le travail en équipe sont utilisées depuis plusieurs années pour l'enseignement de certaines matières et ces méthodes suscitent un intérêt grandissant au niveau collégial. Ces méthodes portent différents noms tels *l'apprentissage par problèmes*, *l'apprentissage coopératif* et *l'apprentissage par projets*. Plusieurs modèles ont aussi été développés pour l'application de chacune de ces méthodes. Il paraît intéressant de présenter ici ces méthodes et ce qui les distingue. Bien que l'activité d'investigation historique ne relève pas directement de l'une des méthodes, elle présente certaines similitudes avec celles-ci.

Apprentissage par problèmes

L'apprentissage par problèmes, auquel on réfère souvent par l'acronyme APP, est probablement la méthode la plus connue et documentée au niveau collégial. Le site internet du *Saut Quantique* (www.apsq.org/sautquantique) présente un dossier complet sur l'APP. Lors d'une activité de type APP, les élèves, regroupés par

équipes, travaillent ensemble à comprendre ou à résoudre un problème pour lequel ils n'ont reçu aucune formation particulière. Ce problème, réel ou réaliste, est présenté autant que possible dans un contexte semblable à celui dans lequel il pourrait se présenter dans la vie réelle. L'APP est une formule flexible : on distingue plusieurs modèles d'APP. Selon l'importance que l'on veut accorder à une activité de type APP, on suivra un modèle d'APP qui sera soit de type « apprentissage par les pairs » (formule simplifiée de l'APP), soit de type « micro », soit de type « réflexif ». L'APP réflexif est la forme la plus complexe de l'APP, elle demande aux élèves d'évaluer les sources d'information qu'ils ont utilisées, d'évaluer également leurs connaissances antérieures et leur raisonnement initial et de voir comment ils peuvent avoir une meilleure compréhension du problème sur la base de ce qu'ils ont appris. Selon Ouellet et Gilbert (1997), l'APP réflexif s'inscrirait dans une perspective socioconstructiviste :

« (...) l'APP réflexif vise à placer les élèves dans une situation concrète où l'application d'algorithmes ou recettes est impossible. La situation crée un déséquilibre cognitif, c'est-à-dire un besoin de connaissances ou de réorganisation du savoir ou des procédures déjà existantes afin de progresser dans la recherche d'une ou de solutions. (...) De plus, lors de l'application de cette approche, l'interaction entre pairs de même que la mise en commun et la critique des idées lors des plénières visent une co-construction des nouvelles connaissances et le développement d'habiletés interpersonnelles. (...) Utilisée dans une perspective socioconstructiviste, l'APP réflexif élargit la vision des ressources utilisées pour construire les connaissances. » (Ouellet, Gilbert, 1997)

Apprentissage par projets

L'apprentissage par projets se distingue de l'APP principalement par l'objet de l'activité qui n'est pas non un problème soumis par l'enseignant mais plutôt un projet qui peut être défini en collaboration avec les élèves. L'apprentissage par projet se fait en plusieurs étapes, il peut être intégrateur entre différentes matières académiques et requiert généralement un temps de classe plus considérable que l'apprentissage par problèmes. Lors de l'apprentissage par projets, l'enseignant fournit peu d'instructions précises et agit comme ressource auprès des élèves.

Apprentissage coopératif

La méthode de l'apprentissage coopératif met l'accent sur l'importance de créer des équipes hétérogènes, sur l'importance de fournir des instructions claires et précises sur le travail à effectuer (Stahl, 1994). L'apprentissage coopératif est basé aussi sur la responsabilisation, par l'attribution de rôles précis, de chacun des membres de l'équipe (Alwin, 1994). Cette responsabilisation peut être faite par le biais d'attribution de rôles précis à chaque membre ou par une division de la matière à approfondir entre les membres de l'équipe. La responsabilisation favorise l'interdépendance positive des coéquipiers: les membres de l'équipe ont un but commun qui ne peut être atteint que par l'apport et le succès de chacun, et qui exige le partage des ressources individuelles. L'apprentissage coopératif peut s'appliquer à la réalisation de plusieurs types d'activités, de simples activités de partage de lecture à des activités plus complexes telles celles propres à l'apprentissage par problèmes ou à l'apprentissage par projets.

Particularités des méthodes basées sur le travail en équipes

Le tableau 1 résume les différentes particularités qui caractérisent chacune des trois méthodes de travail en équipe présentées. Remarquons toutefois que ces particularités ne sont pas absolues : comme il y a plusieurs versions de chaque méthode et plusieurs modèles relatifs à l'application de chaque méthode, chaque méthode peut prendre différentes formes.

Tableau 1 – Particularités des méthodes basées sur le travail en équipes

Méthodes	Particularités des méthodes
Apprentissage par problème	<ul style="list-style-type: none"> • Problème réel ou réaliste • Aucune formation particulière sur le problème avant l'activité d'apprentissage
Apprentissage coopératif	<ul style="list-style-type: none"> • Équipe hétérogènes • Instructions précises sur le travail à effectuer • Responsabilisation des membres de l'équipe
Apprentissage par projets	<ul style="list-style-type: none"> • Les élèves peuvent participer à la définition du projet • Le projet peut être intégrateur.

4. Conceptions des élèves relatives à la vision et à la lumière

Les conceptions des élèves relatives à la lumière sont relativement bien documentées dans la littérature (Dedes 2005, Fetherstonhaugh et al. 1987, Watts 1985). Notons toutefois que ces études ne concernent pas nécessairement les élèves du niveau collégial. De plus, la plupart des recherches publiées étudient non pas les conceptions relatives à la nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière, mais les conceptions relatives à la propagation de la lumière, à la vision et à la formation des images en optique géométrique.

On ne peut donc que dresser un portrait approximatif des conceptions alternatives sur la nature de la lumière que les élèves du collégial pourraient exprimer. Deux sources d'informations peuvent être particulièrement utiles afin de dresser ce portrait : l'étude d'Ambrose et al. (1998), qui documente plusieurs erreurs d'élèves de premier cycle universitaire dans la compréhension des modèles de la lumière, et l'étude de Galili et Hazan (2000), qui porte non seulement sur les conceptions d'élèves en bas âge mais aussi sur les conceptions sur la lumière d'étudiants en éducation. Cette dernière étude fait aussi une synthèse des conclusions d'un ensemble de travaux précédents.

Synthèse de Galili et Hazan

Galili et Hazan (2000) regroupent dans leur synthèse les conceptions en *schèmes de connaissance*. Galili et Hazan définissent ces schèmes ainsi:

« Schemes of knowledge are other elements in knowledge architecture, conceived by us as representing a more inclusive unit of higher level of abstraction. (...) A scheme exposes the common core explanatory pattern deployed by an individual for addressing different settings. » (Galili, Hazan, 2000, p. 60)

Galili et Hazan présentent deux schèmes relatifs à la vision et la nature de la lumière : le schème de la vision spontanée et le schème de la lumière corporelle.

Schème de la vision spontanée

Le schème de la vision spontané implique que la vision est une activité naturelle résultant de l'action de l'œil. Dans ce schème, il n'est pas nécessaire qu'il y ait un lien, un échange, entre l'endroit observé et l'œil. Les élèves qui adhèrent à ce schème expriment souvent l'idée qu'une condition suffisante pour qu'un objet soit observé est qu'il soit dans le champ de vision.

Schème de la lumière corporelle

Les conceptions des élèves au sujet de la nature de la lumière correspondent souvent à un schème où la lumière est perçue comme un objet corporel. Dans ce *schème de la lumière corporelle*, les élèves conçoivent la lumière comme objet dans l'espace, ou parfois sur une surface (un écran, une surface lumineuse). Ce schème correspond à un modèle statique de la lumière qui la considère soit comme une entité qui remplit l'espace et y demeure, soit comme une entité qui réside dans une lueur autour d'une source lumineuse. Ce schème comprend par exemple les conceptions suivantes :

- la lumière est brillante et donc se voit mieux dans le noir,
- un faisceau de lumière demeurant ou voyageant dans l'espace peut être vu de côté,
- la lumière demeure comme une lueur autour des sources lumineuse, (chandelle, ampoule, feu, etc.),
- le ciel est illuminé car la lumière du soleil remplit l'espace et y demeure stationnaire.

Lorsque les élèves suivent un cours d'optique géométrique, ce schème affecte aussi leur façon d'imaginer les rayons de lumière. Les rayons sont conçus littéralement comme le matériel constituant la lumière. L'illumination d'une surface est l'atteinte de celle-ci par la propagation des rayons de lumière. Les phénomènes de réflexion et de réfraction sont alors respectivement conçus comme

des rebondissements et des courbures des rayons. Comme les cours d'optique géométrique élémentaire ne présentent pas de modèles qui expliqueraient le comportement particulier et la nature des rayons lumineux, il est raisonnable que les élèves perçoivent des rayons comme des entités concrètes. Les conceptions suivantes correspondent alors à ce schème :

- la lumière est formée de (plusieurs ou une infinité de) rayons de lumière qui remplissent l'espace,
- les rayons de lumière ressemblent aux fibres d'une corde,
- les rayons de lumière s'étendent et illuminent l'espace ou les surfaces.

Le schème présenté dans les paragraphes précédents est issu d'une synthèse de plusieurs études fait avec des enfants, des adolescents et des étudiants en éducation, il est donc raisonnable de penser que les élèves du collégial puissent exprimer certaines des conceptions mentionnées dans ce schème.

Étude d'Ambrose et al.

L'étude d'Ambrose et al. (1998) peut nous donner une idée de l'évolution des conceptions des étudiants suite à un premier cours d'introduction en optique physique. Selon cette étude, plusieurs étudiants confondent les modèles de la lumière propres à l'optique géométrique, à l'optique ondulatoire et à la dualité onde-corpuscule. Ces étudiants n'identifient pas pour l'étude d'une situation donnée le modèle qui s'applique le mieux et combinent de façon inappropriée des éléments des trois modèles. Les raisonnements des étudiants montrent les conceptions erronées suivantes :

- la diffraction de la lumière s'explique par une déviation des rayons de lumière près des bords d'une ouverture,
- les photons se déplacent en lignes droites qui courbent près des ouvertures,
- les photons se déplacent suivant des trajectoires sinusoïdales,
- deux photons ou plus sont nécessaires pour qu'un phénomène d'interférence ondulatoire puisse se produire.

5. Éléments historiques reliés au développement des modèles de la lumière

Cette section retrace les grandes lignes de l'évolution des modèles de la lumière depuis le modèle de la vision de l'Antiquité jusqu'au modèle de la dualité onde-corpuscule. Ce texte permet d'identifier des idées directrices qui servent à l'élaboration de l'activité d'investigation historique.

Le modèle de la vision de l'Antiquité

Au cinquième siècle avant Jésus Christ, Empedocle postule que tout l'univers est composé de quatre éléments ; le feu, air, la terre et l'eau. Il a cru qu'Aphrodite a fabriqué l'œil humain à partir de ces quatre éléments, qu'elle a allumé le feu dans l'œil, que celui-ci a émergé de l'œil et qu'il a ainsi rendu la vue possible. Par contre, en appliquant la logique de ce modèle on déduit qu'on devrait pouvoir voir pendant la nuit aussi bien que pendant le jour. Empedocle postule donc une interaction entre les rayons des yeux et les rayons d'une source telle que le soleil.

Empédocle a écrit ses pensées sous forme de poèmes. La notoriété de ces poèmes est non seulement due aux idées nouvelles d'Empédocle, mais aussi à la notoriété d'Empédocle lui-même. Empédocle est un citoyen important de la cité d'Agrigente, en Sicile, il est un brillant orateur et on lui attribue plusieurs pouvoirs dont la capacité de guérir les maladies et de contrôler la nature.

Autour de l'an 300 avant Jésus-Christ, Euclide rédige, sous le titre d'Éléments une sorte d'encyclopédie des sciences mathématiques en 15 livres. Dans le livre *Optica*, il étudie les propriétés de la lumière. Euclide postule que la lumière voyage en lignes droites, il décrit les lois de la réflexion et les étudie mathématiquement. Il questionne aussi le modèle des rayons qui émergent des yeux : il se demande comment il se fait qu'on puisse voir les étoiles immédiatement lorsqu'on ouvre les yeux la nuit. Naturellement, si le faisceau de l'œil voyage à une vitesse infinie, ce n'est pas un problème.

On sait peu de chose sur la vie d'Euclide. On croit qu'il est originaire d'Athènes. À Athènes, Euclide participe à la vie politique. Mais à un certain moment de sa vie Euclide s'établit dans la cité d'Alexandrie, en Égypte. Il est un contemporain de Ptolémée 1^{er}, un général de l'Armée d'Alexandre le Grand. Celui-ci, ayant reçu l'Égypte en partage à la mort d'Alexandre le Grand, fonde le musée d'Alexandrie, qui comprend la célèbre Bibliothèque d'Alexandrie. Des intellectuels et des savants de plusieurs pays ont été alors mobilisés à Alexandrie afin de traduire en Grec les ouvrages que la bibliothèque accumulait. Euclide travailla au musée

d'Alexandrie et y fonda l'École des mathématiques. Entouré de ses disciples, il y mena de nombreux travaux de recherche. Il y a probablement rencontré Archimède.

À Alexandrie, cinq cents ans plus tard, au deuxième siècle après Jésus-Christ, le philosophe grec Ptolémée étudie quantitativement le sujet de la réfraction de la lumière. Dans cette étude, Ptolémée adopte le modèle *des rayons qui émergent des yeux*. Ptolémée expose dans un traité nommé *Optique* quelques expériences visant à mesurer les effets de la réfraction du rayon visuel sur la surface de séparation entre des matières transparentes de densité différente : air/eau, air/verre, verre/eau. Outre *Optique*, Ptolémée fut l'auteur de plusieurs autres traités scientifiques plus connus, dont certains ont exercé par la suite une très grande influence sur les sciences islamique et européenne.

Le modèle de l'optique géométrique

Les savants arabes ont été en possession de la partie principale des travaux helléniques sur l'optique. Ils détiennent les traductions de l'optique d'Euclide, de l'optique de Ptolémée à l'exception du premier livre et de la catoptrique de Héron d'Alexandrie.

Au début du 11^e siècle, Alhazen remet en question le modèle de la vision de l'Antiquité. Alhazen commença sa carrière de scientifique dans sa ville natale de Bassora. Il fut cependant convoqué par le calife Hakim qui voulait régulariser les

inondations du Nil qui frappait l'Égypte années après années. Par contre, après avoir mené une expédition en plein désert pour remonter jusqu'à la source du fameux fleuve, Alhazen se rend compte que ce projet est pratiquement impossible. De retour au Caire, il craint que le calife qui est furieux de son échec ne se venge et décide donc de feindre la folie. Le calife le confine donc dans sa résidence personnelle.

Confiné à résidence personnelle, Alhazen profite de ce temps pour écrire plusieurs livres sur des sujets variés comme l'astronomie, la médecine, les mathématiques et l'optique. En optique, Alhazen se base sur des observations simples (l'œil est ébloui et peut même être blessé par une lumière trop intense) et sur des arguments logiques (il est possible de voir immédiatement les étoiles lorsqu'on ouvre les yeux la nuit) pour affirmer que la vision ne peut être le fait de rayons qui émergent des yeux. Alhazen développe un modèle où chaque point illuminé d'un objet réfléchit les rayons de lumière dans toutes les directions, mais où seulement un rayon provenant de chaque point, qui heurte l'œil perpendiculairement, peut être vu. Les autres rayons heurtent à différents angles et ne sont pas vus.

Alhazen considérait les rayons de lumière comme des jets des particules minuscules qui voyage à une vitesse finie. Alhazen a écrit, de 1015 à 1021, un traité de sept volumes sur l'optique. Dans ce traité, Alhazen écrit que lumière ne voyage pas instantanément mais doit voyager à une grande vitesse. Il explique que

la réfraction de la lumière est provoquée par la différence de vitesse de propagation de la lumière dans différentes substances.

Le traité d'Alhazen a été traduit en latin à la fin du 12^e et au début de 13^e siècle et a été imprimée en 1572. Ainsi, le modèle de la vision d'Alhazen a influencé développement de la science européenne du moyen-âge. Au 13^e siècle, le franciscain Roger Bacon cite Alhazen et reprend son modèle de la lumière. John Pecham, un autre franciscain, poursuit le travail de Bacon et écrit *Perspectiva communis*, un ouvrage sur la vision qui est basé sur le modèle d'Alhazen.

Le modèle ondulatoire au 17^{ième} siècle

Au dix-septième siècle, la nature de la lumière était sujette à des spéculations théoriques. On assiste alors à un débat entre les tenants d'un modèle corpusculaire et les tenants d'un modèle ondulatoire de la lumière. Plusieurs considèrent les écrits de René Descartes (1596-1650) comme étant à l'origine de ce second modèle.

Indépendant de fortune, Descartes s'intéresse à tous les domaines scientifiques, de la philosophie à la biologie en passant par la physique. Descartes s'intéresse entre autres à la dioptrique et il est d'abord inspiré par le traité de Kepler sur ce sujet. En 1633, Descartes écrit le *Traité du monde et de la lumière*, où il expose sa théorie sur la lumière. Cependant, ayant appris la condamnation par l'Église Catholique de Galilée pour son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*,

Descartes décide de ne pas publier son traité. En 1637, Descartes publie le *Discours de la méthode* et en annexe à cette œuvre philosophique, Descartes publie *Dioptrique*, où il expose sa théorie sur la lumière et sur la diffraction.

Descartes voit la lumière comme une perturbation de pression transmise instantanément à travers un milieu composé de minuscules 'globules' transparents. La théorie de la réfraction de la lumière de Descartes suppose, inexactement, que la lumière voyage plus rapidement dans un milieu plus dense que dans un milieu moins dense. Descartes arrive à cette conclusion par analogie avec le comportement des ondes sonores. La théorie de Descartes est souvent considérée comme le précurseur de la théorie ondulatoire de lumière.

À la suite de Descartes, Christiaan Huygens (1629–1695) établit sa propre théorie ondulatoire de la lumière. Né en 1629 à La Haye, Huygens fait ses études à l'Université de Leyden, et se lie d'amitié avec René Descartes, fréquemment invité à la maison familiale. La réputation de Huygens en dynamique et en optique se répandit dans toute l'Europe et il devint membre fondateur de la Royal Society en 1663. Plutôt solitaire, Huygens n'attirait pas les étudiants ou les disciples et mit beaucoup de temps à publier ses découvertes. Huygens développe sa théorie ondulatoire de la lumière en 1678, mais il ne la publie qu'en 1690, après une visite en Angleterre, au cours de laquelle il rencontre Isaac Newton.

En démontrant que les phénomènes optiques de réfraction et de réflexion interne s'expliquent par un changement de vitesse de propagation dans le corps réfractant, Huyghens améliore la notion de lumière en tant que vibration d'un milieu. Selon lui, ce changement est dû à l'interaction entre l'éther, le milieu de propagation de l'onde lumineuse, et les particules des corps transparents. Toutefois la théorie de Huygens est basée sur une mauvaise prémisse : par analogie avec l'onde sonore, Huygens conçoit la lumière comme une onde longitudinale (les oscillations du milieu lors du passage de l'onde sont parallèles à la direction de propagation). Cette prémisse limite la théorie de Huygens et l'empêche d'expliquer la diffraction de la lumière.

Le modèle corpusculaire de Newton

En parallèle au développement du modèle corpusculaire, Pierre Gassendi (1592-1655), un atomiste, propose une théorie où les rayons de lumière sont formés de particules. Cette théorie est éditée à titre posthume en 1660. Isaac Newton (1642–1727) étudie le travail de Gassendi et préfère la vue de Gassendi à la théorie ondulatoire de Descartes et de Huygens. Newton considère la lumière comme composée de corpuscules (particules de matière) qui sont émis dans toutes les directions à partir d'une source. Comme Huygens, Newton pense que la réflexion interne et la réfraction de la lumière sont produites par le changement de vitesse qui a lieu lors du passage de la lumière entre deux corps transparents, mais ce changement de vitesse s'effectue dans le sens inverse de celui proposé par

Huygens, et il s'effectue à l'aide des forces répulsives des particules d'un milieu élastique, dont la densité est variable.

Newton explique aussi que toutes les couleurs coexistent dans un faisceau de lumière blanche et explique la séparation des couleurs par un prisme. Newton cherche alors à utiliser dans son modèle de la lumière sa théorie de la gravitation universelle, ce qui lui vaut les critiques sévères de Huygens. Newton acceptait difficilement les critiques, par conséquent les deux chercheurs s'isolèrent avec leur théorie respective.

Newton édite la version finale de sa théorie dans un traité intitulé *Opticks* en 1704. Assurée par la réputation de Newton, alors membre de la *Royal Society of London* fondée en 1662, la théorie de particules de lumière a dominé la physique pendant le 18ème siècle. En France, Laplace adopte cette vision corpusculaire de la lumière. Laplace est membre de l'*Académie royale des sciences* et nommé sénateur par Napoléon, il jouit donc d'une grande notoriété. Il peut aller chercher les élèves les plus doués de l'école Polytechnique pour travailler avec lui et il peut imposer ses idées. On appelle alors *les Laplaciens* les personnes qui défendent les idées de Laplace.

Le modèle ondulatoire au 19^{ième} siècle

En 1801, l'hypothèse selon laquelle la lumière est un mouvement ondulatoire réapparaît en Angleterre dans une théorie proposée par Thomas Young (1773–1829). Cette théorie rend compte de plusieurs phénomènes liés à la diffraction à l'aide d'un éther universel et d'un principe d'interférence des ondes. Young démontre, par des expériences simples, que la lumière se comporte comme une onde dans certaines situations. Dans les expériences de Young, un faisceau de lumière diffracte lors du passage par une très petite ouverture. Les expériences de Young démontrent aussi que deux faisceaux de lumière peuvent interférer entre eux comme des vagues qui se superposent à la surface de l'eau.

À son début, la théorie de Young ne compte que peu d'adeptes en Angleterre. On lui reproche de ne pas expliquer deux phénomènes optiques : la polarisation de la lumière et la biréfringence. En France, la théorie de Young n'attire pas non plus l'intérêt des savants, à quelques exceptions près. Il faut attendre 16 ans pour que l'hypothèse ondulatoire recommence une percée en France grâce à Augustin Fresnel (1788–1827). Fresnel, ingénieur de formation, s'intéresse à la nature de la lumière dans ses loisirs. En apprenant que Young a aussi étudié la question, Fresnel le rencontre en 1816 pour discuter de sa théorie. La rencontre est courtoise, mais Young affiche tout de même une attitude condescendante face à la paternité de ses idées. Ils sont dès lors en compétition. Fresnel établit donc indépendamment sa propre théorie ondulatoire de lumière en 1817. Cette théorie

réussit à rendre compte aussi bien de la diffraction que de la polarisation de la lumière.

En 1818, les Laplaciens, partisans du modèle corpusculaire de la lumière, organisent un concours sur les franges de diffraction. Les Laplaciens désirent avoir un mémoire qui démontrerait hors de tout doute la nature corpusculaire de la lumière. Fresnel présente un mémoire (sous un faux nom!) et, au grand désarroi du comité, c'est son mémoire qui retient l'attention. Ensuite, dans un des épisodes les plus connus de l'histoire de la physique, Siméon Denis Poisson, un Laplacien, ajoute bien malgré lui au travail mathématique de Fresnel. Poisson démontre mathématiquement que si la théorie ondulatoire de Fresnel s'avère, alors on devrait retrouver un point lumineux situé exactement au centre de l'ombre derrière un obstacle placé sur le trajet d'un faisceau lumineux.

Poisson est convaincu que ce point ne pourrait exister et que donc la théorie de Fresnel serait déclarée fausse. Cependant, François Arago (1786-1853) prouve expérimentalement l'existence du fameux point lumineux. Ce point portera ensuite le nom de tache de Poisson. Comme Arago est directeur de l'Observatoire de Paris et aussi membre de l'Académie des sciences, les Laplaciens doivent reconnaître l'excellence du travail rigoureux de Fresnel.

Jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle, la propagation des ondes de lumière sera un thème de recherche, d'abord en optique physique, ensuite en électromagnétisme.

Vers 1830 la théorie de Fresnel domine le domaine de l'optique, prévoyant de nombreux effets inattendus, comme la polarisation circulaire après deux réflexions internes dans un rhombe, et la réfraction conique déduite par William Rowan Hamilton (1805–1865).

La théorie corpusculaire implique que la lumière voyagerait plus rapidement dans un milieu plus dense, alors que la théorie ondulatoire implique l'opposé. Jusqu'en 1850, la vitesse de la lumière ne peut pas être mesurée assez exactement pour décider quelle théorie était correcte. Le premier à faire une mesure suffisamment précise est Léon Foucault (1819-1868). Son résultat soutient la théorie ondulatoire, et la théorie corpusculaire est finalement abandonnée.

La théorie ondulatoire a cependant une faiblesse qui est que les ondes de lumière, comme les ondes sonores, ont besoin d'un milieu pour la transmission. On a toujours postulé une substance hypothétique appelée l'éther, mais son existence tombe dans le doute vers la fin du dix-neuvième siècle suite à l'expérience de Michelson-Morley. En 1845, Michael Faraday découvre qu'un champ magnétique peut changer l'angle de polarisation d'un faisceau de lumière, un effet maintenant connu sous le nom de rotation de Faraday. C'est alors la première évidence que la lumière est liée à l'électromagnétisme. En 1847, Faraday émet l'idée que la lumière puisse être une vibration électromagnétique à haute fréquence, qui pourrait se propager même en l'absence d'un milieu tel que l'éther.

James Clerk Maxwell (1831-1879), inspiré par travail de Faraday étudie le rayonnement électromagnétique et la lumière. Fils d'avocat, Maxwell eut une vie plutôt aisée. Il étudia à l'université de Cambridge sous la direction des meilleurs professeurs de l'époque. En 1855, il reçut son diplôme de l'université de Cambridge, alors qu'il ne cessait de s'y affirmer. Entre 1860 et 1865, alors que Maxwell occupe une chaire de philosophie naturelle au King Collège de Londres, Maxwell s'intéresse à l'électromagnétisme. Maxwell découvre par un développement purement théorique que les ondes électromagnétiques voyagerait dans l'espace à une vitesse constante, qui s'avère justement être égale à la vitesse de la lumière précédemment mesurée. De ce résultat théorique, Maxwell conclut que la lumière est une forme de rayonnement électromagnétique : il énonce pour la première fois ce résultat en 1862.

En 1873, Maxwell édite un traité sur l'électricité et le magnétisme, qui contient une description mathématique complète du comportement des champs électriques et magnétiques. Cette description mathématique est connue sous le nom d'équations de Maxwell. Peu après, Heinrich Hertz confirme la théorie de Maxwell expérimentalement en produisant et en détectant des ondes radio en laboratoire, et en démontrant que ces ondes se comportent exactement comme la lumière visible, exhibant des propriétés telles que la réflexion, la réfraction, la diffraction, et l'interférence. La théorie de Maxwell et les expériences de Hertz mènent ensuite directement au développement de la radio moderne, du radar, de la télévision, et des communications sans fil.

Le modèle de la dualité onde-corpuscule

Vers la fin du 19^{ième} siècle, une anomalie préoccupe les physiciens : le rayonnement du corps noir. Lorsqu'on chauffe un objet, celui-ci émet de la lumière (comme le filament d'une ampoule). Si l'on considère seulement la lumière émise par l'objet, et non la lumière extérieure que l'objet pourrait réfléchir, alors pour parler de ce rayonnement émis par l'objet on utilise le terme rayonnement du corps noir. Or, les physiciens du dix-neuvième siècle n'ont pas de théorie qui puisse décrire adéquatement le spectre émis par un corps noir.

En 1900, Max Planck développe une nouvelle théorie du rayonnement du corps noir qui explique le spectre observé correctement. Cependant, la théorie de Planck est basée sur l'idée que les corps noirs perdent de l'énergie par paquet discret, des quanta, lorsqu'ils émettent de la lumière (et tout autre rayonnement électromagnétique). L'énergie d'un quanta est proportionnelle à la fréquence de la lumière qui est émise. Bien que la théorie de Planck permette de décrire adéquatement le spectre d'un corps noir, la plupart des scientifiques de l'époque, donc Planck, n'envisagent pas que l'idée que l'énergie soit quantifiée puisse être réaliste.

Vers la fin du 19^{ième} siècle, on remarque aussi que le modèle électromagnétique ne permet pas d'expliquer une autre anomalie expérimentale : l'effet photoélectrique. Par cet effet, la lumière heurtant une surface en métal éjecte des électrons de la surface. Les mesures expérimentales démontrent que l'énergie de différents

électrons éjectés est proportionnelle à la fréquence, plutôt qu'à l'intensité, de la lumière incidente. En outre, au-dessous d'une certaine fréquence minimale, qui dépend du métal duquel les électrons sont éjectés, aucun électron n'est éjecté, même si l'intensité lumineuse est très grande.

D'après le modèle ondulatoire de la lumière, l'énergie de l'onde lumineuse est répartie sur toute la surface éclairée et cette énergie est d'autant plus grande que la lumière est intense. Ce modèle est incapable d'expliquer pourquoi, sous une certaine fréquence seuil d'onde lumineuse, une très grande intensité de lumière est incapable d'éjecter le moindre électron. Le modèle est aussi incapable d'expliquer comment, à partir d'une certaine fréquence seuil d'onde lumineuse, des électrons peuvent être expulsés même si l'intensité de lumière est très faible.

Albert Einstein (1879-1955) résout ce puzzle en ressuscitant la théorie corpusculaire de la lumière pour expliquer l'effet observé. Einstein publie en 1905 trois mémoires, tous trois d'une importance cruciale: la théorie statistique du mouvement brownien, l'interprétation de l'effet photoélectrique et la théorie de la relativité restreinte, qui modifiait les lois de la mécanique newtonienne et posait l'équivalence masse-énergie $E = mc^2$. En 1905, Einstein n'a pratiquement aucune notoriété. Il travaille comme commis dans un bureau de brevet et développe ses idées le soir en discutant avec quelques amis. Aussi les idées d'Einstein prennent un certain temps à être acceptées par la communauté scientifique.

Dans son mémoire sur l'effet photoélectrique, Einstein postule que la lumière est constituée de photons. Le nom photon est choisi pour correspondre à d'autres particules décrites à la même époque, tel que l'électron et le proton. Lorsqu'un photon de lumière incidente entre en collision avec un électron du métal, celui-ci peut être éjecté si le photon possède une énergie suffisante. Or l'énergie du photon est, selon Einstein qui reprend l'idée de Planck, proportionnelle à la fréquence de la lumière incidente.

En 1911, le congrès Solvay réunit les plus grands noms de la physique (Einstein, Planck, Curie, etc.). Grâce aux brouillons du compte-rendu de ce congrès, le jeune Louis de Broglie prit connaissance des idées d'Einstein. C'est à partir des travaux que de Broglie entreprit par la suite que les photons ne sont plus les seuls corpuscules auxquels on associe une onde.

En 1924, Louis de Broglie a émis l'hypothèse que toutes les particules qui composent la matière ont à la fois un comportement ondulatoire et un comportement corpusculaire. Son hypothèse a été confirmée quelques années plus tard lorsque C. J. Davidson et Lester Germer observent la diffraction d'un faisceau d'électrons sur un bloc de nickel. Einstein a reçu le prix Nobel en 1921 pour son travail avec la dualité d'onde-corpuscule sur les photons, et de Broglie suivit en 1929 pour sa prolongation à d'autres particules.

L'hypothèse de Broglie signifie aussi que l'onde associée à un corpuscule est une onde de probabilité. Le photon correspond donc à une onde de probabilité quantique. On ne peut prévoir à l'avance ce que va faire un photon dans une situation donnée, on peut seulement prévoir les probabilités associées à chacune des possibilités.

6. *Éléments à retenir pour l'élaboration de l'investigation historique*

On peut faire un parallèle entre d'une part les schèmes de la vision spontanée et de la lumière corporelle de Galili et Hazan (2000) et d'autre part le modèle de la vision de l'Antiquité. Le modèle de la vision de l'Antiquité suppose que les yeux émettent des rayons qui permettent de voir la lumière alors que dans le schème de la lumière corporelle un faisceau laser restant ou voyageant dans l'espace peut être vu du côté. Il y donc là une similitude importante.

D'autre part, l'étude d'Ambrose et al. (1998) montre que les élèves ont de la difficulté à comprendre le phénomènes de diffraction et d'interférence de la lumière et que souvent ils analysent une situation qui nécessite le modèle ondulatoire de la lumière, ou celui de la dualité onde-corpuscule, en appliquant des notions propres au modèle de l'optique géométrique ou au modèle de la vision de l'Antiquité.

Dans l'histoire des modèles de la lumière, outre plusieurs facteurs humains qui ont influencé le développement de ces modèles, on remarque trois phénomènes physiques dont l'étude a été le moteur des développements et des changements de modèles de la lumière. Ces phénomènes sont la réfraction, la diffraction et l'effet photoélectrique.

La réfraction permet d'établir deux modèles concurrentiels au 17^{ème} siècle. Au 18^{ème} siècle, le modèle corpusculaire domine à cause de facteurs humains. Au 19^{ème} siècle, l'étude de la diffraction oblige à privilégier le modèle ondulatoire. Au 20^{ème} siècle, le modèle ondulatoire (qui est devenu électromagnétique) se fait ébranler par son impossibilité à rendre compte de l'effet photoélectrique. Un nouveau modèle émerge, la dualité onde-particule. Cependant ce modèle est plus complexe, la lumière y comporte à la fois des caractéristiques corpusculaires et à la fois des caractéristiques ondulatoires. L'énergie est regroupée en photons, des quanta d'énergie qui peuvent interagir avec d'autres particules en des endroits précis mais les photons sont aussi décrits par des ondes de probabilités quantiques.

Afin de cibler les difficultés rencontrées par les élèves telles qu'identifiées dans les études de Ambrose et al. (1998) et de Galili et Hazan (2000), il semble que l'investigation historique devrait donc se pencher particulièrement sur:

- les événements entourant le passage du modèle de la vision de l'Antiquité au modèle de l'optique géométrique,

- les événements entourant le passage du modèle corpusculaire au modèle ondulatoire.
- les événements entourant le passage du modèle ondulatoire au modèle de la dualité onde-corpuscule.

7. Questions de recherche

La présente étude cherche à évaluer comment la réalisation d'une investigation historique peut permettre de favoriser le changement conceptuel. La question de recherche générale formulée à la problématique est :

Quels apports l'investigation historique de l'évolution des modèles de la lumière a-t-elle sur les conceptions associées à la nature de la lumière chez les élèves du programme de sciences de la nature au niveau collégial?

L'objectif principal de cette recherche est donc d'expérimenter un outil, une investigation historique, et de voir quel effet celui-ci a sur les conceptions des apprenants. Cet objectif principal sous-entend un objectif implicite qui est d'amener les apprenants à formuler des conceptions qui sont conformes aux concepts scientifiques actuels. En plus de l'objectif principal, il pourrait être intéressant aussi d'identifier l'apport de l'investigation sur le processus de changement conceptuel. Selon les modèles du changement conceptuel, le changement conceptuel s'opère soit par une rupture avec les conceptions initiales,

soit par une évolution du cadre théorique de l'apprenant, soit par une sélection et une utilisation adéquate des bonnes habitudes interprétatives. S'il y a rupture, celle-ci peut être provoquée par un conflit cognitif ou par un conflit socio-cognitif.

Afin de répondre aux buts principal et secondaire énoncés ci-haut, on se pose les questions spécifiques suivantes :

1. Quelles sont les conceptions des apprenants sur la nature de la lumière après qu'ils aient suivi un cours d'introduction à l'optique géométrique et à l'optique ondulatoire?
2. Comment ont évolué les conceptions des apprenants sur la nature de la lumière après la réalisation de l'investigation historique?
3. Lors de l'investigation historique, peut-on identifier des situations où les élèves remettent en question leurs conceptions? Peut-on associer le processus de changement conceptuel alors observé à l'un ou l'autre des modèles de changement conceptuels?

Cadre méthodologique

Les questions posées étant ouvertes et subjectives, il apparaît pertinent de les aborder par le moyen d'une recherche qualitative. Les paragraphes qui suivent exposent premièrement l'activité d'apprentissage, l'investigation historique, composée de quatre recherches ciblées afin d'étudier les modèles de la lumière. Ensuite, on présente les méthodes de travail pour recueillir des données, lors et suite à la réalisation de l'activité.

1. L'Investigation historique et les rapports de recherche

L'investigation historique a été réalisée lors d'un cours d'onde optique et physique moderne de l'enseignement régulier en sciences de la nature au cégep. L'activité comporte plusieurs parties. Les élèves ont dû premièrement se préparer pour l'activité principale en lisant des fiches qui leur ont été distribuées. Les fiches résument les positions, les contributions et les contextes sociaux propres à quelques personnages qui ont joué un rôle dans l'élaboration des modèles de la lumière. L'activité principale a été répartie sur 4 périodes de 50 minutes de cours. En équipe de quatre les élèves ont dû jouer le rôle d'investigateurs historiques. Les élèves ont dû compléter trois rapports de recherche, portant sur :

- Le passage du modèle de la vision de l'Antiquité au modèle de l'optique géométrique;
- Le débat entre les modèles corpusculaire et ondulatoire au 17^{ième} et 18^{ième} siècle;

- Le passage du modèle de l'onde électromagnétique à celui du photon au début du 20^{ième} siècle.

Au terme de ces recherches, les élèves ont complété une quatrième recherche dont l'objectif est d'identifier quatre contributions qui semblent les plus marquantes dans l'histoire des modèles de la lumière. Chaque équipe a dû ensuite justifier par écrit deux de ces choix en discutant de la contribution, de son importance dans l'évolution de l'histoire des modèles de la lumière et du contexte historique dans lequel s'est fait cette contribution. Les questions auxquelles les élèves ont dû répondre lors de ces recherches sont présentées en annexe 1.

Lors du déroulement de l'activité principale, les élèves étaient aussi invités à échanger avec l'enseignant sur les lectures et les questions de recherche. Ces échanges ont été enregistrés avec un dictaphone. L'intention de ces échanges était d'aider les élèves dans leur recherche mais aussi de recueillir des informations sur la démarche des élèves. Dans sa démarche, l'enseignant essaye d'aider les élèves à explorer les représentations qu'ils possèdent. Cette démarche est inspirée des expériences sur le conflit sociocognitif (Astolfi et al, 1997, p.39). Pour sa cueillette d'information, l'enseignant évite de poser des questions trop directes et tente de reformuler les verbalisations des élèves afin de les inviter à préciser leur raisonnement. Cette méthode est propre à l'entretien d'explicitation (Vermesh, 2003).

Sans être basée sur un modèle en particulier, l'élaboration de cette activité de recherche est inspirée de deux modèles. Le modèle le plus près de celui utilisé est celui de l'investigation historique telle que proposée par Arthur Stinner (Stinner, McMillant et Al, 2003). Celui-ci propose une activité où les élèves travaillent en équipes à un projet de recherche. Cependant, dans le modèle de Stinner les élèves s'intéressent à un événement en particulier dans l'histoire des sciences et essaient de retracer le déroulement possible de l'histoire entourant cet événement précis. Comme nous pensions que les conceptions intuitives des élèves relatives à la lumière avaient des traits communs avec des modèles de différentes époques, il ne paraissait pas pertinent de s'intéresser à un seul événement.

Les expériences basées sur le conflit sociocognitif ont aussi certains points en commun avec l'activité de recherche réalisée (Astolfi et Al, 1997, p.39). Les lectures préalables suscitent les représentations initiales et enrichissent les échanges lors de l'activité d'apprentissage. La formation des équipes n'a toutefois pas été contrôlée, il n'y avait donc pas de mécanisme permettant de s'assurer que les représentations des membres des équipes soient hétérogènes. Tel qu'exposé au chapitre précédent, dans le cadre de l'enseignement collégial, il y a plusieurs concepts scientifiques à apprendre et les représentations concernant ces concepts sont multiples. Il serait donc très difficile d'utiliser des activités d'apprentissage où il faudrait à toutes les fois sonder les représentations afin de s'assurer de former des équipes hétérogènes. Comme la préoccupation principale de cette recherche est de travailler sur le « comment » l'histoire des sciences peut

être intégrée à la pratique de l'enseignement des sciences au niveau collégial, il paraissait plus réaliste de ne pas contrôler la formation des équipes.

2. Les sujets

La recherche a été réalisée au cégep de Maisonneuve auprès de 80 élèves inscrits au cours d'onde, optique et physique moderne (code du ministère de l'Éducation : 203-NYA). Ce cours fait parti du programme pré-universitaire de Sciences de nature.

Lors de ce cours, les élèves étudient les modèles de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire. Il est généralement admis au début du cours que les élèves sont familiers avec l'idée que la lumière réfléchiée ou émise par un objet s'éloigne de l'objet dans toutes les directions en lignes droites. Les élèves étudient la réflexion et la réfraction, représentent des tracés de rayons dans différents systèmes optiques et résolvent des problèmes numériques pour une variété de systèmes optiques simples. Ces tracés et rayons sont propres au modèle de l'optique géométrique.

Plus tard dans la session, les élèves rencontrent le modèle de l'optique ondulatoire. Ils voient les concepts et représentations formels utilisés pour prédire et expliquer la diffraction et l'interférence. Finalement, les élèves sont confrontés aux résultats de l'expérience de l'effet photoélectrique. On souligne alors le fait que les

résultats de l'expérience ne correspondent pas aux prédictions que l'on pourrait faire en utilisant le modèle ondulatoire de la lumière. L'imbroglia est résolu par la présentation du modèle du photon et de la dualité onde-corpuscule.

L'activité d'investigation historique a été réalisée à la fin de la session, après que tous les modèles de la lumière aient été vus en cours. Les données de recherches proviennent de plusieurs sources :

- Conceptions des élèves : un prétest réalisé par les élèves permet d'analyser qualitativement leurs conceptions et les difficultés conceptuelles qu'ils ont avec les différents modèles de la lumière.
- Discussion lors de l'activité de recherche : lors du déroulement de l'activité d'apprentissage, les élèves étaient aussi invités à échanger avec l'enseignant sur les lectures et les questions de recherche. L'analyse de la retranscription des discussions pourrait indiquer une évolution conceptuelle de certains élèves lors de l'apprentissage des modèles. Lors de ces discussions, l'enseignant évite de poser des questions trop directes et tente de reformuler les verbalisations des élèves afin de les inviter à préciser leur raisonnement. Cette méthode est propre à l'entretien d'explicitation (Vermesh, 2003). Les discussions sont analysées de façon qualitative afin d'identifier les éléments qui ont pu mener à des évolutions conceptuelles.
- Post-test : un post-test, qui utilise le même questionnaire que le prétest, permet d'apprécier l'évolution des conceptions des élèves.

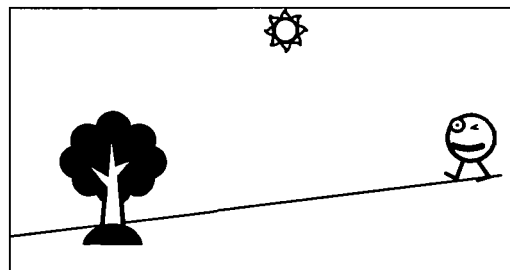
3. Le prétest et le post-test

Avant et après le déroulement de l'investigation historique, on utilise un test pour évaluer les difficultés conceptuelles rencontrées par les élèves en regard de la nature de la lumière et du modèle à utiliser. Ce test est fortement inspiré des l'étude de Galili et Hazan (2000) et de Ambrose et al. (1998). Il consiste en une série de questions écrites.

Partie A

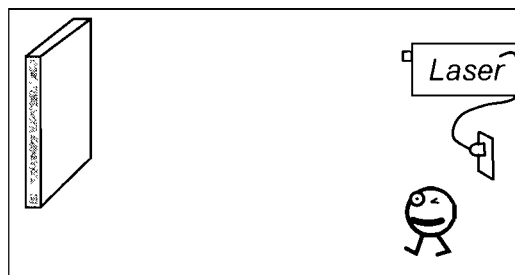
À la partie A, on veut vérifier les conceptions des élèves concernant la vision et la propagation de la lumière. On pose aux élèves les trois questions suivantes :

1. *Considérer la situation ci-contre. L'observateur à droite du dessin voit l'arbre. Comment cela est-il possible?*



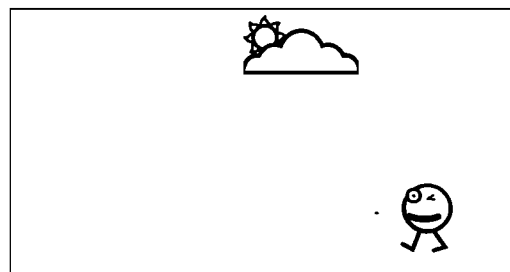
Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.

2. *Considérer la situation ci-contre. Un laser émet un faisceau vers l'écran. Que voit l'observateur?*



Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.

3. *Considérer la situation ci-contre. Le jour le ciel paraît illuminé, même si un nuage se trouve devant le soleil.*



Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.

Pour répondre à ces trois questions, l'élève peut utiliser le modèle de l'optique géométrique, les rayons de lumière se propagent en ligne droite et peuvent être réfléchis ou diffusés. À la question 1, l'élève devrait expliquer que la lumière émise par le soleil est réfléchiée par l'arbre en direction de l'œil de l'observateur. La lumière est captée par l'œil et c'est ce qui permet à l'observateur de voir l'arbre. On s'attend donc à ce que l'élève fasse une relation entre la lumière émise par le soleil, la lumière réfléchiée par l'arbre et la lumière qui entre dans l'œil de l'observateur.

À la question 2, l'élève devrait conclure que l'observateur voit un point sur l'écran et expliquer que la lumière émise par le laser se propage en ligne droite vers l'écran et est ensuite réfléchiée dans toutes les directions. Une partie de la lumière réfléchiée se dirige donc vers l'œil de l'observateur et celui-ci perçoit la lumière qui entre dans son œil.

À la question 3, l'illumination du ciel s'explique par le fait que l'atmosphère diffuse la lumière émise par le soleil : le soleil émet de la lumière dans toutes les

directions, lorsque cette lumière traverse l'atmosphère une partie de la lumière est diffusée et est donc réémise dans toutes les directions. Une partie de la lumière diffusée se dirige donc vers l'œil de l'observateur et celui-ci perçoit la lumière qui entre dans son œil.

Les réponses des élèves à ces trois questions sont analysées en fonction des schèmes de la vision instantanée et de la lumière corporelle tels que défini par Galili et Hazan (2000).

Partie B

À la partie B, on veut vérifier si les élèves distinguent bien les modèles de l'optique ondulatoire et de l'optique géométrique et identifient bien dans quelles situations ils peuvent s'appliquer. On présente aux élèves une figure (figure 1) représentant un montage simple.

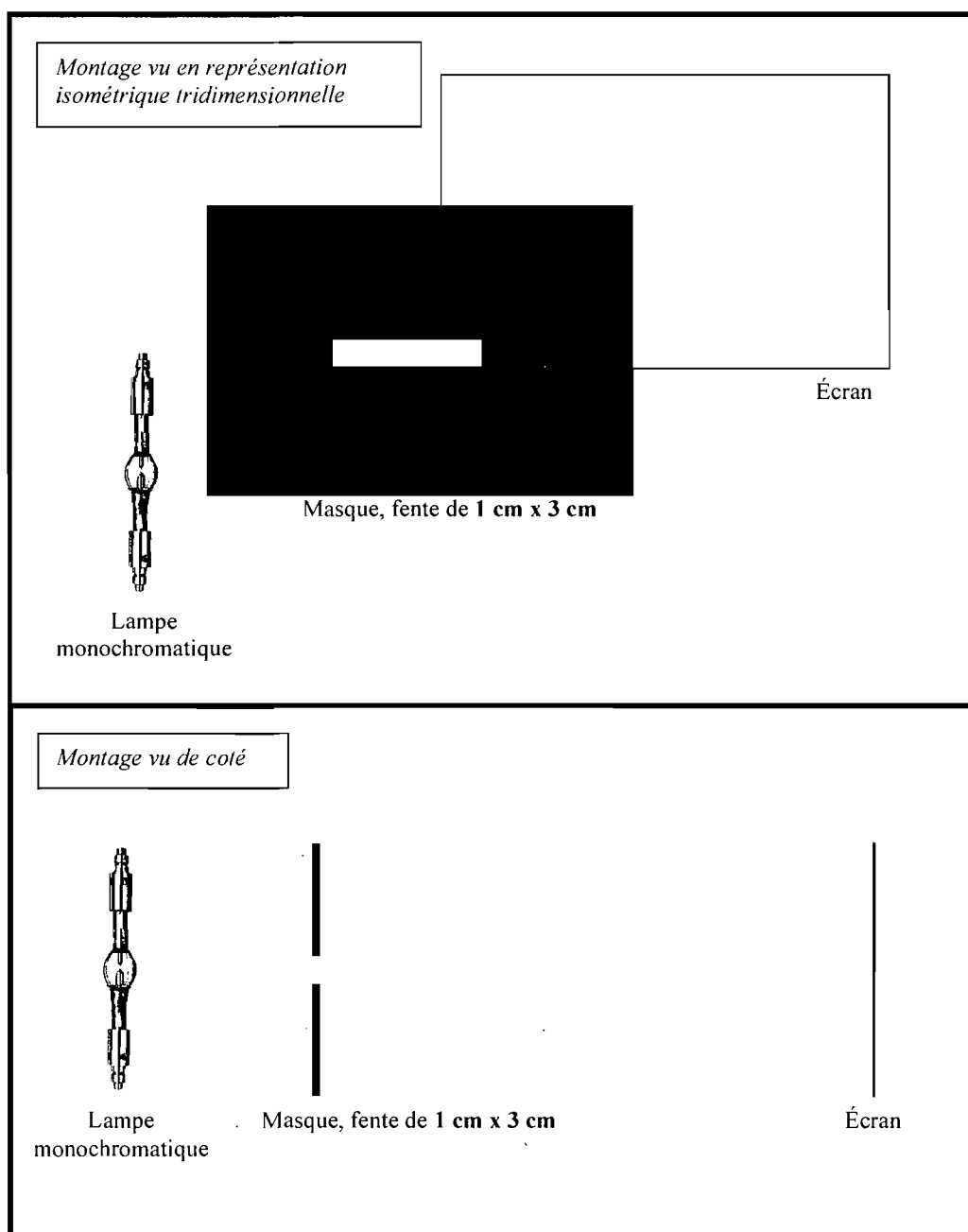
En se basant sur la figure 1, on demande aux élèves de répondre par un schéma et une explication aux questions suivantes :

4. Si la lampe est allumée et que la pièce est sombre, que peut-on observer sur l'écran?

5. Si la lampe est éloignée de plus en plus loin du masque, comment-est ce que cela affecterait ce qui est observé sur l'écran?

6. En supposant que la lampe soit très loin du masque (et très brillante), si on diminue progressivement la largeur de la fente jusqu'à ce qu'elle devienne très mince, comment-est ce que cela affecterait ce qui est observé sur l'écran?

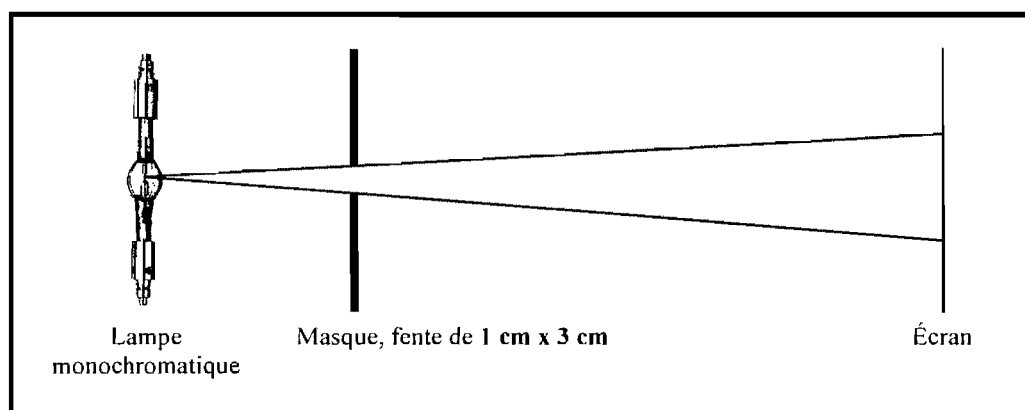
Figure 1 : Montage de la partie B du prétest



Pour répondre à ces trois questions, les élèves peuvent se baser sur les sujets vus pendant la session lors de l'étude des modèles géométrique et ondulatoire de la

lumière. Un élève peut répondre aux questions 4 et 5, qui comportent une ouverture large, en représentant des lignes droites, qui proviennent de la lumière, passent par l'ouverture et se termine sur l'écran, tel qu'illustré à la figure 2.

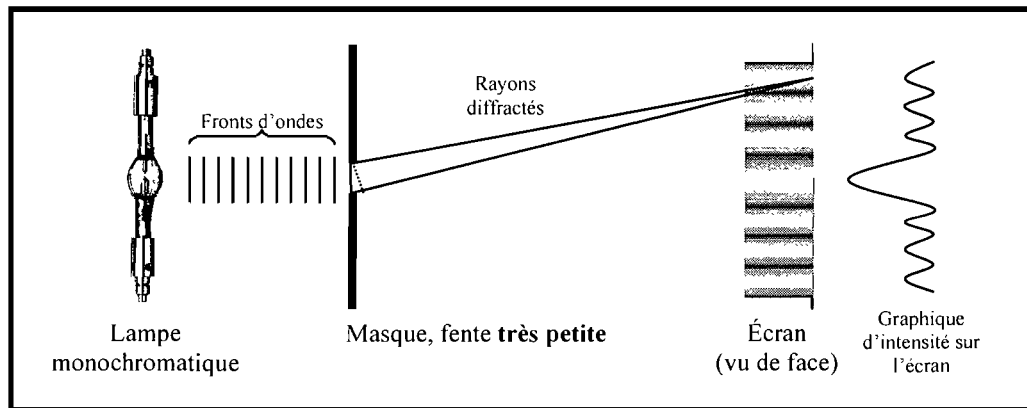
Figure 2 : Schéma qui représente la région illuminée dans le cas d'une ouverture large



Quand on éloigne la lampe, l'élève devrait reconnaître que les rayons deviennent parallèles et que la portion illuminée sur l'écran diminue, jusqu'à approcher celle de l'ouverture du masque.

À la question 6, lorsqu'on amincit la fente, éventuellement le modèle de l'optique géométrique n'est plus valide et l'on obtient sur l'écran un patron de diffraction avec un maximum central brillant et des minimas secondaires plus petits, tel qu'illustré à la figure 3 :

Figure 3 : Schéma qui représente la région illuminée dans le cas d'une ouverture très mince

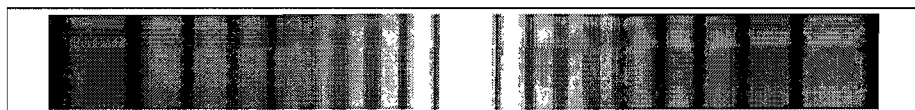


Si l'ouverture est réduite d'avantage, le premier minimum s'éloigne du centre et le maximum central s'élargit. Lorsque l'ouverture est plus petite que la longueur d'onde de la lumière, il n'y a plus de minimum observable et le maximum central occupe tout l'écran.

Partie C

À la partie C, on veut vérifier que les élèves comprennent bien le modèle de l'optique ondulatoire. On présente premièrement aux élèves un patron de diffraction (figure 4) en spécifiant que celui-ci est obtenu par la diffraction de la lumière qui traverse une fente mince.

Figure 4 : Patron de diffraction



En se basant sur la figure 4, on demande aux élèves de répondre par un schéma et une explication aux questions suivantes :

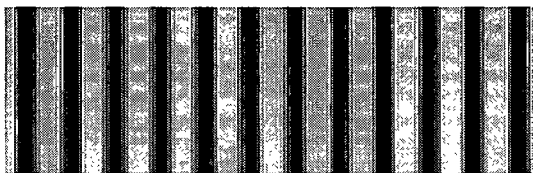
7. Si l'on couvre une portion de la fente allant de son centre à son extrémité droite, comment cela affecterait-il la distance entre les premiers minima de part et d'autre du maximum central?
8. Dans le montage qui permet d'obtenir cette figure, comment se compare la longueur d'onde de la lumière à la largeur de la fente ? (Dites si l'une de ces grandeurs doit être supérieure à l'autre et expliquez pourquoi.)

À la question 7, couvrir une moitié de la largeur de la fente revient à diminuer sa largeur. En conséquence, les premiers minima d'intensité devraient se retrouver plus loin du centre de la figure de diffraction et le maxima central devrait être plus large. Cette conclusion qu'on obtient en appliquant le modèle de l'optique ondulatoire est contraire à ce que l'on pourrait penser en appliquant le modèle de l'optique géométrique (une ouverture moins large correspondrait à une portion éclairée plus petite sur l'écran).

À la question 8, il faut que la fente soit plus large que la longueur d'onde sinon on ne pourrait pas observer de premiers minimums d'intensité. Une mauvaise compréhension du modèle ondulatoire de la lumière peut mener à penser que la largeur de la fente doit être plus petite que la longueur d'onde pour qu'il y ait de la diffraction, ou sinon que si la largeur de la fente est plus petite que la longueur d'onde alors la lumière ne peut passer par l'ouverture.

Toujours dans la partie C, on présente ensuite aux élèves un patron d'interférence (figure 5), en spécifiant que ce patron est obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux fentes minces.

Figure 5 : Patron d'interférence



En se basant sur cette figure d'interférence, on demande aux élèves la question suivante :

9. Si dans le montage qui a permis d'obtenir cette figure on couvre la fente de droite, comment cela affecterait-il la figure?

Pour répondre à cette question, il faut réaliser que si l'on couvre une des fentes, il ne peut plus y avoir d'interférence. En conséquence, l'écran devrait alors être presque uniformément illuminé, sans minimums d'interférence visibles. En appliquant des idées d'optique géométrique, on pourrait plutôt penser que la figure produite par une seule fente serait la même que celle obtenue avec deux fentes, mais tout simplement moins intense, ou encore que la figure d'interférence disparaîtrait du côté droit, puisqu'on couvre la fente de droite.

Partie D

À la partie D, on veut vérifier que les élèves comprennent les limites d'application du modèle de l'optique ondulatoire et appliquent correctement le modèle de la dualité onde-corpuscule. Pour ce faire, en se référant à la figure d'interférence présentée à la section C (figure 5), on pose la question suivante aux élèves :

10. On diminue progressivement l'intensité de la lumière jusqu'à ce que celle-ci soit extrêmement infime, on remplace l'écran par un film

photographique et on expose le film pendant une période suffisamment longue pour qu'on puisse obtenir une image visible sur le film lorsqu'il sera développé. Cette figure pourrait-elle être différente de la figure d'interférence précédente? Comment et pourquoi?

Pour répondre à cette question, l'élève doit premièrement réaliser que lorsque l'on diminue l'intensité, à un certain moment celle-ci ne pourra plus être continue, les photons seront émis un à un. La figure d'interférence sera donc constituée d'un ensemble de petits points représentant les endroits où les photons ont affecté le film. Par contre, ces points ne seront pas distribués au hasard. Dans le modèle quantique, un photon est une onde de probabilité quantique, cette onde interfère avec elle-même après le passage par les deux fentes. Les maxima d'intensité de la figure d'interférence correspondent donc à des maximums de probabilité de l'onde quantique et la distribution des points sur le film va recréer la figure d'interférence.

Pour arriver à cette conclusion, il faut appliquer le modèle de la dualité onde-corpuscule de la lumière. Le modèle ondulatoire mène plutôt à conclure qu'il y aura une figure d'interférence sur le film, mais que celle-ci sera continue et non formée de points, alors que le modèle purement corpusculaire mène à conclure que la figure sera constituée de points distribués uniformément.

Analyse et interprétation

Introduction

Ce chapitre sur l'analyse et l'interprétation des données est découpé en cinq sections principales. Les trois premières portent sur les conceptions observées au prétest et au post-test et concernent respectivement la vision, l'optique ondulatoire et la dualité onde-corpuscule. À la quatrième section, on analyse l'évolution conceptuelle lors de l'activité d'apprentissage par le biais de la retranscription de discussion. Finalement, le chapitre se termine par une dernière section où les éléments de réponses aux questions spécifiques sont regroupés.

1. Conceptions relatives à la vision

Dans cette section, on recherche les effets d'une investigation historique sur les conceptions des élèves relatives à la vision et au modèle de l'optique géométrique. Ces conceptions sont sondées par la partie A des prétest et post-test.

Conceptions initiales des élèves

Les conceptions énoncées par les élèves aux questions 1 et 2 du prétest sont en grande partie correctes. Cependant, certaines réponses peuvent être associées au schème de la vision spontanée et au schème de la lumière corporelle de Galili et Hazan (Galili, Hazan, 2000).

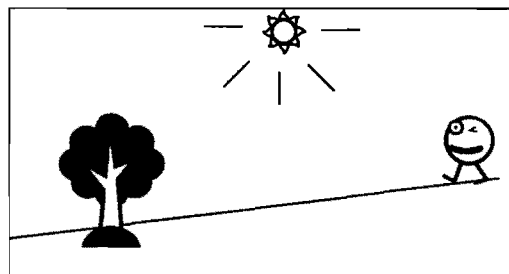
Question 1

À la question 1, on illustre une situation comportant un observateur, un arbre et un soleil. On demande à l'élève d'expliquer pourquoi dans cette situation l'observateur peut voir l'arbre. Sur 80 élèves, 63 ont expliqué correctement que la lumière du soleil est réfléchiée par l'arbre et captée par l'œil de l'observateur. Dix-sept élèves ont formulé des réponses erronées. L'analyse de celles-ci permet d'identifier trois conceptions alternatives. Une première conception qui se retrouve dans les réponses de deux élèves peut être associée au schème de la lumière corporelle de Galili et Hazan (2000). Pour les fins de l'analyse, nous numérotions les conceptions, donc cette première conception est la *conception 1* et s'énonce comme suit:

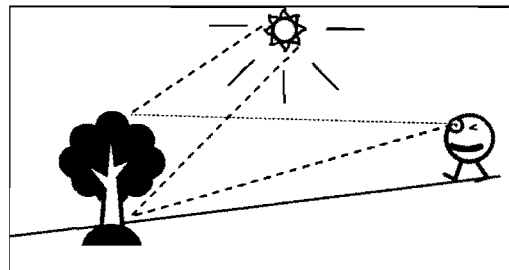
Conception 1 : il suffit qu'il y ait présence de lumière dans un espace pour que la vision soit possible.

Les deux réponses qu'on associe à cette conception sont :

« Le soleil envoie des rayons solaires agissant comme source de lumière pour ne pas qu'on soit plongé dans la noirceur et qu'on puisse distinguer les choses. »



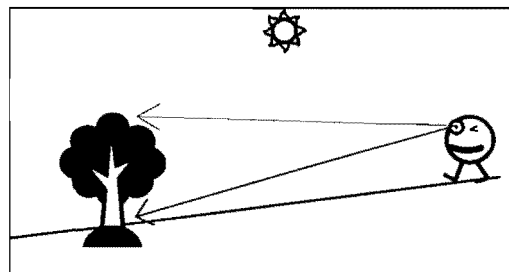
« Les rayons du soleil éclairent l'arbre le rendant observable par le champ de vision de l'observateur à droite du dessin. »



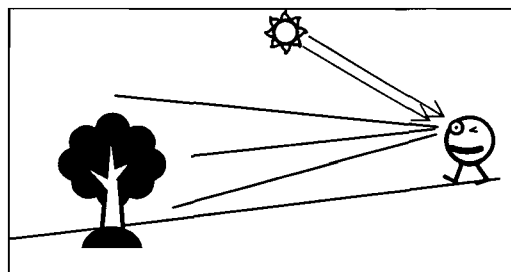
On note cependant un certain écart par rapport au schème de la lumière corporelle de Galili et Hazan puisque la lumière n'est pas nécessairement perçue comme statique dans ces réponses.

Sept autres élèves ajoutent à la conception 1 en représentant des lignes de vision qui sortent de l'œil en direction de l'arbre, ce qui rappelle la conception des Grecs de la vision. Ci-dessous, quelques exemples représentatifs de ces réponses sont reproduits.

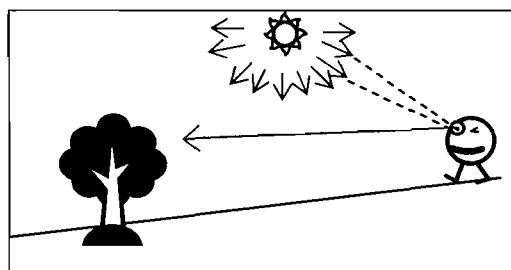
« L'observateur se trouve par-dessus (de façon inclinée) à l'arbre. De cette façon, il peut bien voir le haut et le bas de l'arbre. De plus, puisqu'il y a présence de lumière, rien ne l'empêche de voir. »



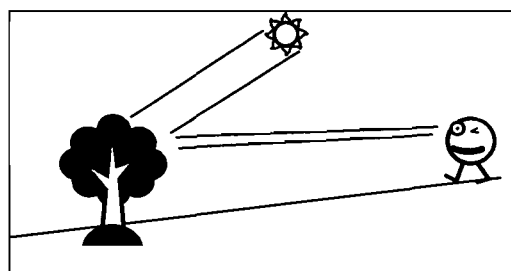
« La lumière du soleil permet que l'on voie les objets. Donc nos yeux peuvent percevoir l'arbre avec ses dimensions réelles. »



« La lumière émise par le soleil permet à l'observateur de voir l'arbre ».



« L'arbre est illuminé par le soleil et le bonhomme regarde l'arbre. Cette interaction permet donc au bonhomme de voir l'arbre »



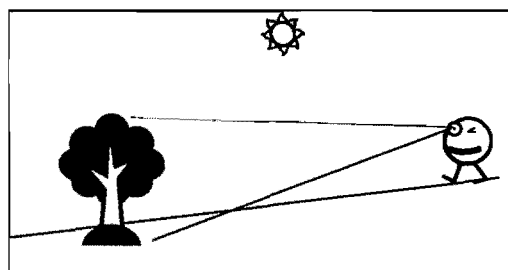
Dans ces exemples, les élèves semblent adhérer à la conception 1, énoncée précédemment, et à la conception 2 énoncée ci-dessous :

Conception 2 : L'œil a un rôle actif dans le processus de la vision.

Cette conception peut être associée au schème de la vision spontanée.

Toujours à la question 1, huit élèves affirment que l'arbre émet des rayons de lumière vers l'observateur, sans faire référence au Soleil comme source de lumière. Les huit réponses de ces élèves sont toutes très similaires à l'exemple suivant:

*« Les objets émettent de la lumière, ainsi
l'œil peut la capter pour ainsi voir. »*



Dans cette réponse, l'élève exprime la conception suivante:

Conception 3 : Dans un espace illuminé, les objets émettent de la lumière.

Il est possible que la conception 3, qui peut paraître au premier abord plutôt étrange, soit le fruit de l'enseignement de l'optique géométrique. En optique géométrique, lorsqu'on veut trouver la position de l'image d'un objet formée par un instrument d'optique, on trace des rayons principaux. Le point de départ de ces rayons est toujours l'objet. Il est donc concevable qu'un élève développe pour les situations scolaires la conception que les objets émettent des rayons de lumière.

Question 2

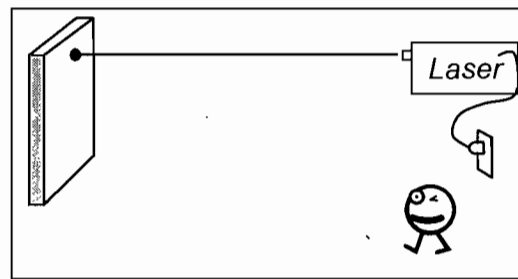
À la question 2, on illustre un laser, un écran et un observateur. On demande ce que l'observateur verrait si le laser émettait un faisceau en direction de l'écran. Cinquante-neuf élèves sur quatre-vingt ont répondu correctement : le faisceau émis par le laser est réfléchi par l'écran dans toutes les directions; certains rayons réfléchis se dirigent donc vers l'œil de l'observateur et font que celui-ci observe un point sur l'écran. Parmi les vingt et une autres réponses, on retrouve les conceptions 1 et 2 énoncées précédemment ainsi que deux nouvelles conceptions :

Conception 4 : Un observateur placé à côté d'un faisceau de lumière peut observer celui-ci.

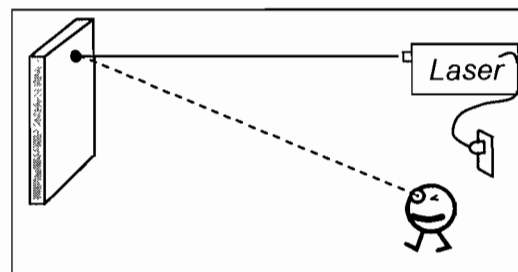
Conception 5 : Un laser émet une figure d'interférence ou de diffraction.

La conception 4 peut être associée à la fois au schème de la lumière corporelle et au schème de la vision spontanée. La conception 5 est un peu surprenante, nous y reviendrons. Voici tout d'abord cinq exemples qui illustrent la présence des conceptions 1 et 2 :

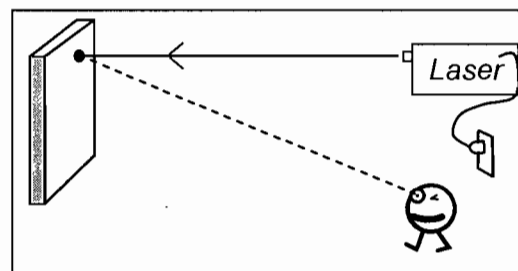
« L'observateur voit un point rouge sur l'écran car le laser envoie un jet de lumière en ligne droite sans déviation »



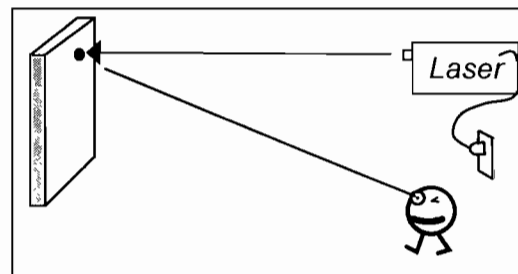
« L'observateur verra sur l'écran un point lumineux de la couleur du rayon laser. »



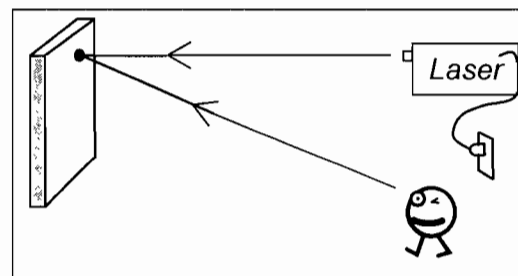
« Le rayon du laser n'est pas réfléchi, donc l'observateur ne voit qu'un point sur le faisceau. »



« L'observateur voit un point (la pointe du laser). La lumière du laser, les rayons du laser sont projetés sur l'écran et forment un point. »

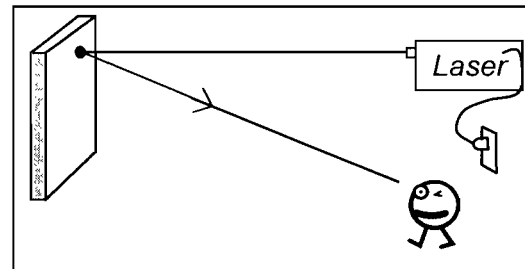


« L'observateur voit un point (lumière rouge du laser) sur le haut de l'écran en levant sa tête. »

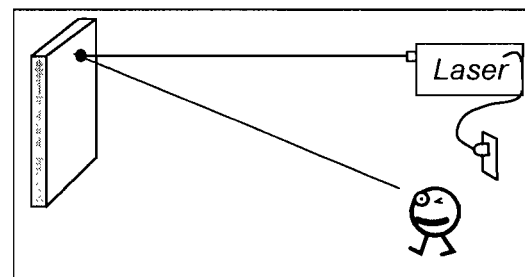


Les conceptions 1 et 2 illustrées par les cinq exemples précédents sont les conceptions alternatives les plus fréquentes. On les retrouve dans quatorze réponses. La conception 4 a été formulée par trois élèves, leurs réponses sont reproduites ci-dessous.

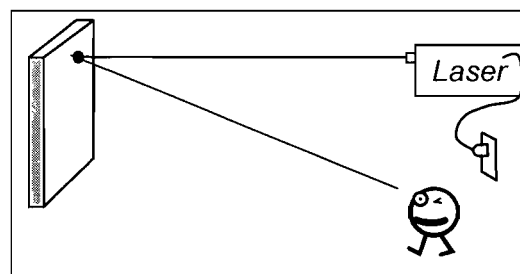
« Le laser permet à la lumière de se propager en ligne droite jusqu'à l'écran. La ligne qu'on voit est continue et elle est composée de paquets d'énergie voyageant à la vitesse c . L'observateur voit tout ce qui est dans son champ de vision c'-à-d. le faisceau continu, le point sur l'écran et l'écran. »



« Il verra un point de lumière sur le miroir ainsi qu'un rayon de couleur (rouge dans le cas du laser) puisque la lumière sera réfléchi »



« L'observateur va voir un point sur le mur où le laser pointe. Il ne verra pas le faisceau du laser ou très peu puisque celui-ci voyage très rapidement. La lumière réfléchie en forme de point sur le mur sera perçue par l'observateur. »



Comme dans le cours d'ondes, optique et physique moderne on utilise des lasers, il est surprenant que des élèves formulent la conception 4. Le dernier exemple de réponse est pour cela intéressant. L'élève sait que l'observateur ne verra pas ou très peu le faisceau, mais il suppose que cela est du à la vitesse de propagation du faisceau. Il semble que, même si par l'expérience l'élève sait qu'on ne peut voir le faisceau, il attribue cette invisibilité du faisceau aux conditions d'observation et ne remet pas en cause sa conception de la vision spontanée et de la nature corporelle de la lumière.

La dernière conception énoncée à la question 2 est la conception 5 : quatre élèves prétendent que l'observateur pourra voir une figure comportant des franges d'interférence sur l'écran. Ces élèves ont manifestement retenu le résultat d'une démonstration faite en classe. La démonstration montrait les figures d'interférences produites par un faisceau laser incident sur un système de fentes. Les élèves ont probablement remarqué que le montage était similaire et ont conclu que le résultat serait le même.

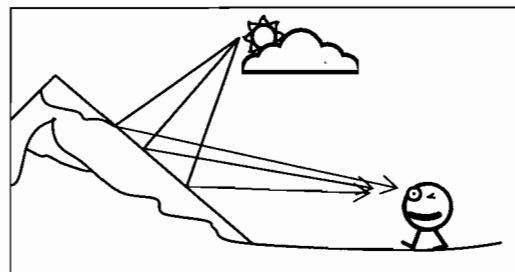
Question 3

À la question 3, on illustre un soleil, un nuage et un observateur. Le nuage est placé entre le soleil et l'observateur. On demande d'expliquer pourquoi dans cette situation le ciel paraît illuminé même si le nuage se trouve devant le soleil.

Seulement quinze élèves ont expliqué correctement que la lumière du soleil était diffusée dans l'atmosphère et qu'une partie était redirigée vers l'observateur. Trente-quatre élèves ont répondu que la lumière passe à travers le nuage et se rend jusqu'à l'observateur et ont représenté des rayons du soleil vers l'œil de l'observateur. Ces élèves conçoivent correctement que pour voir, la lumière doit se diriger vers l'œil de l'observateur, par contre il ne semble pas connaître la diffusion de la lumière. Ils ne se préoccupent pas non plus du fait que la région observée et qui paraît illuminée, le ciel, n'est pas la région d'où provient la lumière.

Cinq autres élèves conçoivent aussi que la lumière doit se diriger vers l'œil de l'observateur, par contre plutôt que de supposer qu'elle passe à travers le nuage, ils postulent plutôt que la lumière se réfléchit sur les objets, comme dans l'exemple suivant :

« Les rayons lumineux sont réfléchis par plusieurs éléments de la nature et atteignent l'œil de la personne. »



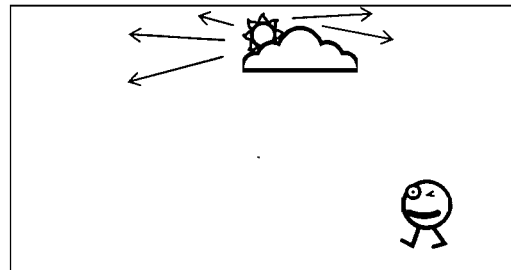
Pour ces élèves, il semble donc que pour que le ciel paraisse illuminé, il suffit que de la lumière atteigne l'œil de l'observateur, même si la lumière ne provient pas de l'endroit observé (le ciel),

Conception 6 : Lorsque de la lumière atteint l'œil d'un observateur, alors tout endroit que l'observateur regarde paraît illuminé.

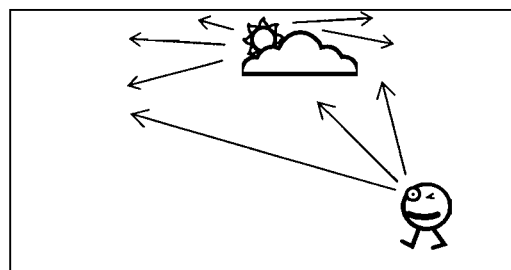
Cette conception s'apparente beaucoup à la conception 2 : l'œil a un rôle actif dans le processus de vision. En effet, dans le cas de la conception 6, il semble que la lumière qui entre dans l'œil permet à celui-ci d'observer (par un processus actif) la luminosité du ciel. On associe donc la conception 6 au schème de la vision spontanée.

Une autre réponse très fréquente à la question 3, formulée par vingt-six élèves, est tout simplement que le ciel est illuminé parce que le soleil y envoie ces rayons comme dans les exemples suivants :

« Car le soleil est un objet réel donc il émet des rayons lumineux dans tous les sens, illuminant ainsi le ciel. »



Le soleil émet une multitude de rayons, donc seulement une petite partie est absorbée par le nuage »



Ces élèves semblent adhérer à la conception 7 :

Conception 7 : Un endroit paraît illuminé lorsque des rayons de lumière s'y propagent.

Cette conception rappelle les conceptions 2 et 4 : l'œil a un rôle actif dans le processus de vision et un rayon de lumière peut être observé de côté.

Conceptions suite à l'activité d'apprentissage

Le tableau 2 montre l'incidence des différentes conceptions dans les réponses des questions 1 à 3 des prétest et post-test. On remarque que l'incidence de conceptions adéquates augmente pour les questions 1 et 2. Par contre, il ne semble pas y avoir de changements notables pour ce qui est de la question 3.

Tableau 2 : Conceptions des élèves énoncées aux questions 1 à 3

	Prétest	Post-test
Question 1	Conception adéquate: 63 Conception 1 : 2 Conception 2 : 7 Conception 3 : 8	Conception adéquate: 70 Conception 1 : 2 Conception 2 : 6 Conception 3 : 2
Question 2	Conception adéquate: 59 Conception 1 : 11 Conception 2 : 3 Conception 4 : 3 Conception 5 : 4	Conception adéquate: 67 Conception 1 : 5 Conception 2 : 3 Conception 4 : 2 Conception 5 : 3
Question 3	Conception adéquate: 15 Conception 6 : 39 Conception 7: 26	Conception adéquate: 14 Conception 6 : 44 Conception 7 : 22

2. Conceptions relatives aux modèles de l'optique ondulatoire

Dans cette section, on recherche les effets d'une investigation historique sur les conceptions des élèves relatives aux modèles de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire. Ces conceptions sont explorées par les parties B et C des prétest et post-test.

Conceptions initiales des élèves

Les résultats de la partie B du prétest montrent clairement que la plupart des élèves ne comprennent pas bien dans quels contextes s'appliquent le modèle ondulatoire de la lumière et le modèle de l'optique géométrique. Sur 80 répondants au prétest, seulement 10 élèves ont utilisé le modèle adéquat à chacune des trois situations. 41 élèves se sont basés uniquement sur le modèle de l'optique géométrique pour répondre à toutes les questions, alors que 14 élèves ont appliqués de façon confuse le modèle de l'optique ondulatoire aux questions 4 et 5 et 15 élèves ont donné des réponses qu'on pourrait qualifier de confuses parce qu'elles ne sont pas en lien avec les questions ou parce que les élèves n'ont pas répondu.

Les résultats de la partie C du prétest montrent aussi beaucoup de conceptions erronées dans l'application du modèle de l'optique ondulatoire pour expliquer la diffraction et l'interférence de la lumière. Ces conceptions semblent indiquer que l'écologie conceptuelle des élèves est formée d'un modèle hybride, où les idées de

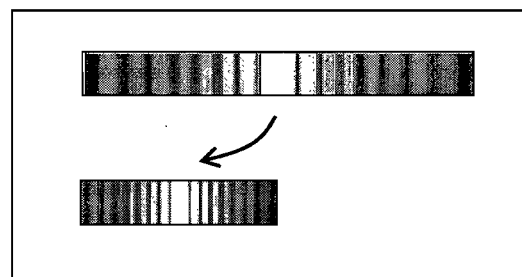
l'optique ondulatoire s'inscrivent dans un cadre théorique plus large, structuré par les concepts de l'optique géométrique. Certaines conceptions montrent aussi un manque de compréhension du modèle ondulatoire de la lumière.

Question 7

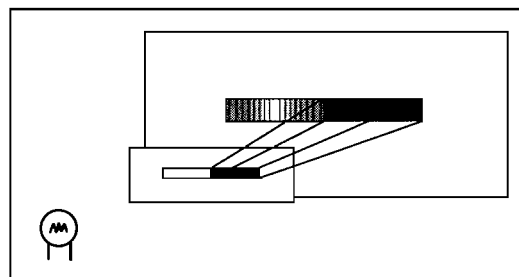
À la question 7, on demande comment un patron de diffraction est affecté lorsque l'on couvre la moitié de l'ouverture dans le montage qui permet d'obtenir ce patron. 23 élèves affirment correctement que comme l'ouverture est plus petite, le patron de diffraction devient plus large et que donc les minima s'éloignent. Cependant, 41 élèves affirment que la réduction de l'ouverture engendre une réduction du patron. La plupart de ces élèves affirment que les minima seraient plus près les uns des autres et représentent un patron de diffraction moins large que celui de la figure du questionnaire. Il y a aussi d'autres variantes de cette conception, comme dans les exemples suivants.

Certains élèves affirment, que le patron sera plus petit et décalé.

« Ça diminuerait de moitié la distance entre les minima et ça déplacerait le centre lumineux vers la gauche »

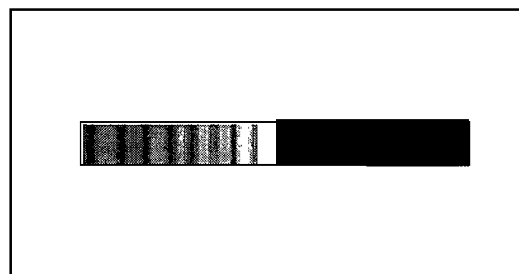


« La distance entre les deux premiers minimas serait moins grande. »



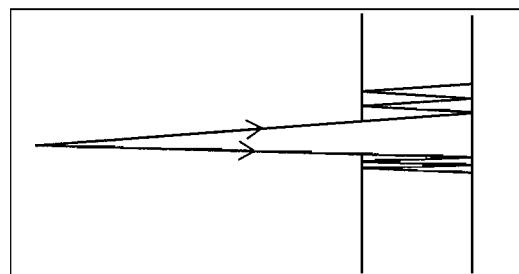
D'autres affirment qu'on ne verrait que la portion non cachée du patron d'interférence.

« Nous ne verrions que la partie gauche de l'image »

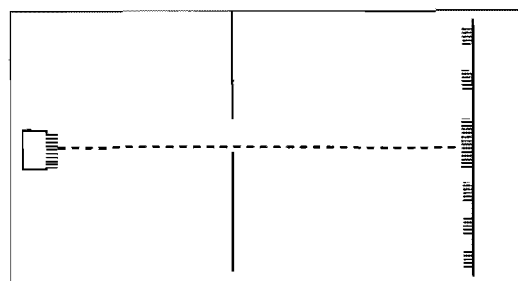


Finalement, certains élèves conçoivent que le patron serait compressé du côté où l'on couvre la fente.

« La distance entre les premiers minimas du côté droit sera plus petite que du côté gauche car l'angle d'incidence sera plus petit. »



*« Ils seraient plus rapprochés d'un côté
puisque'il y aurait moins de lumière étant
donné que la fente serait plus petite »*



Tous ces exemples montrent bien que les conceptions des élèves sont issues d'une superposition des modèles de l'optique géométrique et de l'optique physique. Dans cette superposition, le patron de diffraction est similaire à une image projeté à partir d'une ouverture. Lorsque l'ouverture est réduite, le patron est réduit. Dans les schémas des élèves on retrouve d'ailleurs très souvent des lignes représentant des rayons qui passent par la fente. Or les rayons sont un élément du modèle de l'optique géométrique. On associe donc ces 41 réponses à la conception 8 :

Conception 8 : un patron de diffraction est une image projetée à partir d'une ouverture.

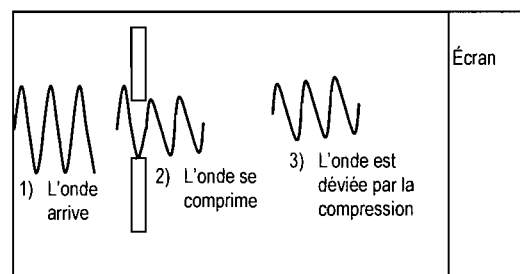
On remarque aussi à la question 7 du prétest que 16 élèves ne comprennent pas le sens de la question. Soit ils répondent de façon confuse, soit ils ne répondent pas à la question.

Question 8

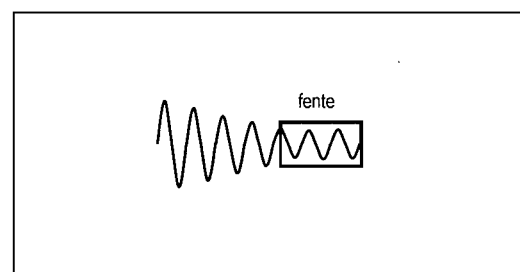
À la question 8 du prétest, pour un montage à une fente qui permet d'obtenir une figure de diffraction, on demande si la longueur d'onde doit être plus petite ou plus grande que l'ouverture de la fente. La réponse attendue est que la longueur d'onde doit être plus petite que l'ouverture, sinon la figure est trop large et on ne peut observer qu'une portion du maxima central.

Il est étonnant de constater qu'aucun élève ne formule la réponse attendue. Pourtant ce concept est bien vu en cours et la plupart des élèves peuvent résoudre des exercices numériques où l'on trouve la largeur du maximum central à partir de la largeur de l'ouverture. Or, même s'ils connaissent l'équation qui relie l'ouverture de la fente à la largeur du maximum central, 25 élèves affirment que si l'ouverture de la fente est plus grande que la longueur d'onde (ou que l'amplitude), il ne peut y avoir de diffraction. Ces élèves semblent croire que l'onde doit se plier ou se comprimer pour s'adapter à l'ouverture et que cette modification de la taille de l'onde crée la diffraction. Souvent ces élèves représentent la lumière par une courbe sinusoïdale, comme dans les exemples suivants.

« La largeur de la fente doit être inférieure à la longueur d'onde. La longueur d'onde doit se comprimer (la largeur de la fente fait diminuer l'amplitude) pour passer, ce qui la fait dévier »



« La longueur d'onde de la lumière doit être plus grande pour être capable de s'accommoder à la largeur de la fente. »

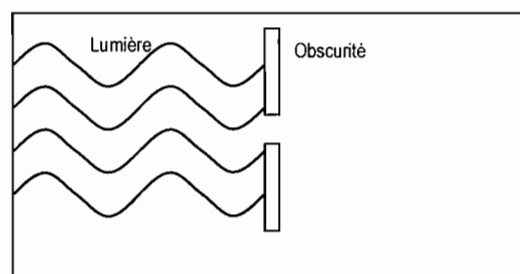


Dans ces représentations, la courbe sinusoïdale qui représente l'onde et qui doit passer par la fente rappelle un faisceau de lumière qui se propagerait en ligne droite dans le modèle de l'optique géométrique. On pourrait aussi y voir un obstacle épistémologique substantialiste de Bachelard (Bachelard, 1938), la lumière étant assimilée à une substance qui doit se comprimer pour passer par une ouverture. Ces 25 réponses qui postulent une fente plus petite que la longueur d'onde ont été associées à la conception 9 :

Conception 9 : *la diffraction de la lumière se produit seulement lorsque la lumière passe par une ouverture qui est plus petite que sa longueur d'onde.*

Toujours à la question 8, 16 élèves affirment que la longueur d'onde (ou l'amplitude) doit être plus petite, ce qui est conforme au concept scientifique, mais ils justifient cette affirmation en postulant que si la longueur d'onde est plus grande que l'ouverture de la fente, la lumière ne passera pas. Dans les schémas qui accompagnent ces affirmations, les élèves représentent aussi souvent les ondes par des courbes sinusoïdales, comme dans l'exemple suivant.

« La fente doit être plus grande que la longueur d'onde, sinon elle devient opaque. »



On associe ces 16 réponses à la conception 10 :

Conception 10 : *la lumière ne peut passer une ouverture si la largeur de l'ouverture est plus petite que la longueur d'onde de la lumière.*

D'autre part, 4 élèves affirment plutôt le contraire : si la longueur d'onde est plus petite que l'ouverture, la lumière ne pourrait passer. Cette dernière affirmation nous semble plutôt confuse et il est difficile de trouver la rationalité de ce raisonnement.

Toujours à la question 8, 7 élèves ont affirmé que la longueur d'onde de la lumière serait plus petite ou plus grande après le passage de la lumière par l'ouverture. Certaines de ces affirmations font référence à la compression de la lumière lors du passage par la fente. D'autres semblent confondre la longueur d'onde avec la distance entre les maxima sur le patron d'interférence. Ces réponses sont associées à la conception 11 :

Conception 11 : *la longueur d'onde de la lumière change lorsque la lumière passe par une ouverture*

Question 9

À la question 9 du prétest, on montre une figure d'interférence produite par l'interférence de la lumière provenant de deux fentes et on demande aux élèves ce qui se produirait si on couvrait une des deux fentes. La bonne réponse est qu'il ne pourrait y avoir d'interférence et qu'on verrait alors un patron de diffraction ou une portion du maxima central d'un patron de diffraction. 35 élèves formulent une réponse qui se rapproche de la précédente. Cependant, 19 élèves affirment plutôt qu'on obtiendrait un patron d'interférence moins intense, ou qu'on obtiendrait la

moitié du patron d'interférence, soit tronqué d'un côté, soit tronqué d'une frange sur deux. Dans cette conception, les élèves semblent croire que chaque ouverture produit la moitié du patron d'interférence. On associe ces réponses à la conception 12 :

Conception 12 : *le patron d'interférence obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux ouvertures est la superposition des images provenant de chacune des ouvertures.*

Toujours à la question 9, huit élèves affirment que la distance entre les franges du patron d'interférence devrait augmenter lorsqu'on couvre l'une des deux ouvertures. Ces élèves semblent croire que couvrir une ouverture dans une expérience d'interférence entre la lumière provenant de deux ouvertures est équivalent à réduire la grandeur de l'ouverture dans une expérience de diffraction de la lumière comportant une seule ouverture. On associe ces réponses à la conception 13 :

Conception 13 : *le patron d'interférence obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux ouvertures s'élargit lorsqu'on couvre l'une des ouvertures.*

Conceptions suite à l'activité d'apprentissage

Les réponses des questions la partie B des prétest et post-test sont classées au Tableau 3. Ce tableau nous indique le nombre d'élèves qui utilisent soit le bon modèle pour chaque situation, soit le modèle de l'optique géométrique pour toutes les situations, soit le modèle de l'optique ondulatoire pour toutes les situations. On remarque dans ce tableau que le nombre d'élèves qui utilisent le bon modèle pour chaque situation augmente sensiblement après l'activité d'investigation historique. On remarque par contre aussi que plusieurs élèves qui utilisaient uniquement le modèle de l'optique géométrique au prétest utilisent ensuite uniquement le modèle de l'optique ondulatoire au post-test.

Tableau 3 : Nombre de réponses à la partie B en fonction des modèles utilisés

	Prétest	Post-test
Bon modèle pour chaque situation	10	25
Modèle de l'optique géométrique pour les trois situations	41	19
Modèle de l'optique ondulatoire pour les trois situations	14	23
Réponses confuses	15	13

Le Tableau 4 représente la compilation des différentes conceptions énoncées par les élèves aux questions de la partie C des prétest et post-test.

Tableau 4 : Conceptions des élèves énoncées aux questions 7 à 9

	Prétest	Post-test
Question 7	Conception adéquate: 23 Conception 8 : 41 Réponse confuse : 16	Conception adéquate: 39 Conception 8 : 33 Réponse confuse : 8
Question 8	Conception adéquate: 0 Conception 9 : 25 Conception 10 : 20 Conception 11 : 7 Réponse confuse : 28	Conception adéquate: 2 Conception 9 : 29 Conception 10 : 19 Conception 11 : 4 Réponse confuse : 26
Question 9	Conception adéquate: 35 Conception 12 : 19 Conception 13 : 8 Réponse confuse : 18	Conception adéquate: 45 Conception 12 : 11 Conception 13 : 13 Réponse confuse : 11

Conception 8 : *un patron de diffraction est une image projetée à partir d'une ouverture.*

Conception 9 : *la diffraction de la lumière se produit seulement lorsque la lumière passe par une ouverture qui est plus petite que sa longueur d'onde.*

Conception 10 : *la lumière ne peut passer une ouverture si la largeur de l'ouverture est plus petite que la longueur d'onde de la lumière.*

Conception 11 : *la longueur d'onde de la lumière change lorsque la lumière passe par une ouverture*

Conception 12 : *le patron d'interférence obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux ouvertures est la superposition des patrons provenant de chacune des ouvertures.*

Conception 13 : *le patron d'interférence obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux ouvertures s'élargit lorsqu'on couvre l'une des ouvertures.*

Entre les prétest et post-test, on remarque que l'incidence de conceptions adéquates énoncées à la question 7 augmente et que l'incidence de la conception 8 diminue de façon significative. Par contre, les conceptions 9, 10 et 11 énoncées à la question 8 ne semblent pas affectées. Les conceptions adéquates énoncées à la question 9 augmentent tandis que la conception 12 diminue. De plus, plusieurs des élèves qui formulaient une réponse confuse à la question 9 au prétest, expriment la conception 13 au post-test.

Donc, de façon générale, on peut croire que l'activité d'investigation historique aide certains élèves à départager les modèles de l'optique ondulatoire et de l'optique géométrique. Plus d'élèves choisissent les bons modèles à la section B et moins d'élèves formulent les conceptions 8 et 12 qui sont clairement issues d'une superposition des deux modèles de la lumière.

Les conceptions 9 et 10 sont problématiques. Ces conceptions montrent un manque de compréhension du modèle ondulatoire de la lumière. Les élèves qui formulent la conception 9 semblent croire qu'il y a une démarcation nette entre les situations où il y a diffraction de la lumière et où il n'y en a pas. Les élèves qui formulent la conception 10 confondent peut être les phénomènes de diffraction et de polarisation de la lumière. Malheureusement, ces deux conceptions résistent à l'activité d'investigation historique.

3. Conceptions relatives à la dualité onde-corpuscule

Dans cette section, on recherche les effets d'une investigation historique sur les conceptions des élèves relatives au concept de photon et de dualité onde-corpuscule. Ces conceptions sont sondées par la question 10 des prétest et post-test.

Conceptions initiales des élèves

À la question 10 des prétest et post-test, on demande d'imaginer qu'on réduit l'intensité dans un montage qui produit une figure d'interférence jusqu'à ce que l'intensité soit infinitésimale. On s'attend ici à ce qu'un élève qui connaît le modèle de la dualité onde-corpuscule réalise qu'à une certaine intensité, la composante corpusculaire de la lumière n'est plus négligeable et qu'il faut envisager la possibilité qu'un photon à la fois traverse le système de fentes. Dans ce cas, chaque photon peut être considéré comme une onde de probabilité incidente sur le système de fentes et les prédictions de l'optique ondulatoire demeurent les mêmes. On devrait donc observer une figure d'interférence similaire, avec des franges sombres et claires. Par contre, les franges claires de cette figure seront composées d'un ensemble de petits points représentant les endroits où les photons ont rencontré le film.

Sur les quatre-vingt répondants au prétest, seulement huit ont abordé le sujet du photon dans leur réponse. Trente-huit élèves ont plutôt répondu en se basant

uniquement sur le modèle ondulatoire et ont dit que la figure serait identique. Sur les huit qui ont pensé à la dualité onde-corpuscule, trois élèves ont formulé la réponse attendue. Cinq élèves ont réalisé qu'une diminution de l'intensité correspond à une diminution du nombre de photons envoyés en même temps, mais n'ont pas imaginé qu'à un certain point les photons puissent être envoyés un à la fois.

On remarque aussi une conception erronée qui a été formulée par sept élèves. Cette conception provient probablement d'une confusion entre l'intensité du rayonnement et l'énergie des photons. Lorsque l'énergie des photons diminue, la longueur d'onde augmente.

Conception 14 : *un changement d'intensité de la lumière correspond à un changement de longueur d'onde.*

Finalement, vingt-sept élèves, le tiers des répondants, ont répondu de façon confuse ou n'ont pas répondu à la question 10.

Conceptions suite à l'activité d'apprentissage

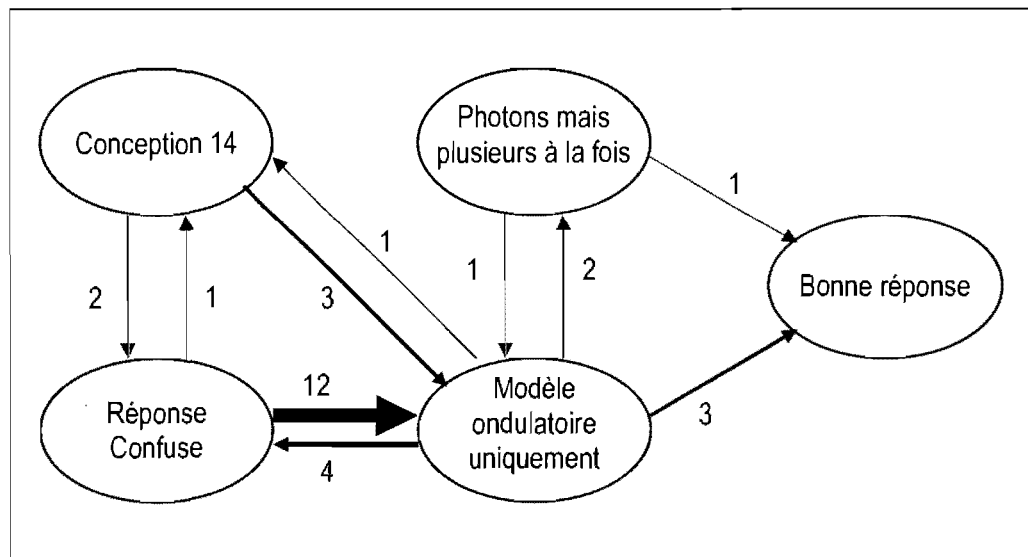
Les réponses à la partie D sont classées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Réponses à la partie D au prétest et post-test

	Prétest	Post-test
Bonne réponse	3	7
Réponse comprenant le concept de photon mais sans imaginer que les photons puissent être envoyés un à la fois	5	5
Réponse basée sur le modèle ondulatoire uniquement	38	43
Conception 14	7	4
Réponse confuse	27	21

Le tableau précédent nous montre peu de changements entre les incidences de chaque type de réponses à la partie D. Pourtant, une analyse plus attentive permet de voir que les réponses de plusieurs élèves ont changé. La figure 6 montre dans quels sens se font ces changements. Les chiffres à côté des flèches indiquent le nombre d'élèves qui ont changé de la conception de laquelle la flèche origine vers la conception pointée par la flèche.

Figure 6 : Changements de réponses à la question 10 du prétest au post-test



La figure précédente illustre que le changement conceptuel procède par étape :

- Premièrement d'une réponse confuse ou de la conception 14 (qui est relativement confuse aussi) vers le modèle ondulatoire
- Deuxièmement du modèle ondulatoire vers le modèle du photon.

4. *Évolution conceptuelle lors de l'investigation*

historique

Les trois sections précédentes de l'analyse permettent de constater que les conceptions exprimées par certains élèves au post-test ne sont pas les mêmes que celles qu'ils ont exprimées au prétest. Nous identifions premièrement dans cette section deux situations lors de l'activité d'apprentissage qui ont pu donner lieu à ces évolutions ou changements conceptuels. Ensuite nous examinons plus en détails les cheminements des membres de deux équipes par une analyse comparative des rapports de recherche et des résultats aux prétest et post-test.

Développement d'une compréhension qualitative de la diffraction de la lumière

Les plus grandes évolutions conceptuelles remarquées dans les trois sections précédentes concernent le passage de l'utilisation d'un modèle hybride de l'optique géométrique et ondulatoire à une utilisation correcte du modèle ondulatoire. En effet, quinze élèves ont bien répondu dans la partie B du post-test, alors qu'ils confondaient les modèles géométrique et ondulatoire lors du prétest. Aussi, seize élèves ont bien répondu à la question 7 du post-test alors que, dans le prétest, ils associaient la figure de diffraction de la partie C à une image de la fente du montage. Nous analyserons ici certains éléments des rapports de la seconde recherche qui semblent confirmer cette évolution conceptuelle.

À la seconde recherche, les élèves devaient en équipe de quatre expliquer les modèles que Newton et Huygens utilisent pour décrire le phénomène de diffraction. Les élèves devaient aussi utiliser chaque modèle afin de prédire l'effet d'une diminution de la largeur de la fente sur la figure de diffraction. Lors de cette tâche, les équipes étaient invitées à poser des questions s'ils rencontraient des difficultés. L'analyse de la retranscription de l'enregistrement d'un échange qui a suivi une question semble montrer que dans ce cas il y a eu un changement conceptuel.

Élève 1 : « Monsieur, on ne comprend pas... qu'est-ce que vous voulez qu'on dise là pour la question avec le modèle de Huygens?... »

Enseignant : « Peux-tu préciser ta question? »

Élève 1 : « Eh oui...ben, à l'autre question avant avec Newton on a compris. La fente est plus petite et ça fait que les rayons vont passer plus proche du bord et puis la force sur les photons va être plus grande et puis ça fait que les rayons vont dévier plus, donc le cône de diffraction devrait être plus large. Mais là avec le modèle de Huygens, on ne sait pas vraiment... »

Enseignant : « Ok, ok. Dans vos mots, comment est-ce que Huygens explique la diffraction de la lumière? »

Élève 2 : « Les fronts d'ondes deviennent sphériques quand ils passent par une fente. »

Enseignant : « Oui! Et si on rapetisse la fente, qu'est-ce qui se passe? »

Élève 1 : « Il va y avoir plus de pression, donc ça fait que les ondes vont être plus petites. »

Enseignant : « ... Êtes-vous toutes d'accord? »

Élève 2 : « Non... ben je ne pense pas que c'est ça. Je ne pense pas qu'on peut dire que c'est de la pression... C'est pas ça l'explication. C'est dans la fente le front devient comme une multitude de sources d'ondes secondaires sphériques, puis c'est la somme de tous les fronts d'ondes qui va faire une onde sphérique. »

Enseignant : « Ok, bon si on rapetisse la fente, là je vais reprendre la question écrite sur la feuille : est-ce que le cône formé par la lumière diffractée va s'élargir ou s'amincir? »

Élève 2 : « Si on rapetisse la fente, on réduit le nombre de sources d'ondes sphériques secondaires qui se propagent, donc le cône va rapetisser. »

Enseignant : « ... Est-ce que c'est possible de faire un schéma rapide pour aller avec l'explication? En fait, deux schémas, un avec une fente large et un avec une fente mince, comme ça on va pouvoir comparer. »

L'élève 1 a fait deux schémas. Chaque schéma montre les fronts d'ondes d'une onde plane incidente sur une ouverture. L'ouverture est plus petite sur un des schémas. Suite au passage de l'onde par l'ouverture, les extrémités des fronts d'ondes deviennent sphériques. On voit très bien que la forme de ces fronts d'ondes est beaucoup plus près de celle d'un demi-cercle dans le cas de l'ouverture plus petite. Suite à la réalisation des schémas l'enregistrement reprend :

Enseignant : « Bon ok maintenant, en regardant ces deux schémas, on reprend encore la question écrite sur la feuille : si on rapetisse la fente, est-ce que le cône formé par la lumière diffracté va s'élargir ou s'amincir? »

Élève 1 : « Il va s'élargir... »

Enseignant : « Pourquoi? »

Élève 1 : « Parce qu'avec la fente plus petite, il y a moins de sources d'ondes dans la fente. Donc ça fait que quand on additionne les fronts d'onde ça fait un front d'onde résultant plus sphérique. »

Dans l'échange précédent, on remarque que l'élève 1 utilisait initialement un modèle qui impliquait le concept substantialiste de pression pour expliquer la diffraction. Au terme de l'échange, son modèle a évolué vers un modèle plus près des concepts scientifiques.

Par contre, la médiation de l'enseignant a sûrement jouée un grand rôle dans ce changement conceptuel. Par la médiation, l'enseignant a amené les élèves à

explorer leurs représentations. Cette méthode est propre aux stratégies orientées sur le conflit sociocognitif comme moteur du changement conceptuel. Par contre ces stratégies identifient la médiation entre les pairs et non la médiation orientée par l'enseignant comme déclencheur de l'exploration des représentations. On peut se demander si de tels changements ont pu se produire spontanément (sans médiation de l'enseignant) dans les équipes qui n'ont pas posé de questions à l'enseignant. On peut se demander aussi si les stratégies axées sur le conflit sociocognitif sous-estiment le rôle de l'enseignant dans un contexte réel d'enseignement. Finalement, dans l'échange rapporté, on déplore que seulement deux membres de l'équipe aient participé à la discussion.

Développement d'une compréhension qualitative du concept d'onde de probabilité

Les résultats à la partie D du post-test diffèrent peu de ceux du prétest. Pourtant, dans les rapports de la troisième recherche certaines équipes ont exprimé des conceptions conformes au concept scientifique de la dualité onde-corpuscule et au concept de l'onde de probabilité. De plus, un enregistrement d'une discussion avec une équipe de trois élèves lors de la troisième recherche semble montrer que les conceptions de ces élèves ont évolué :

Élève A : « Pascal, ça marche pas. On est bloqués là. On a besoin d'aide pour ta question sur Max Born... »

Enseignant : « Ok, qu'est-ce qui vous bloque? »

Élève A : « Bien... on ne sait pas quoi écrire. »

Enseignant : « Oui, mais vous avez sûrement une idée, quelque chose, une ébauche de réponse... »

Élève A : « Ah... oui. Bien on a lu la section 5.2 que tu nous as dit de lire et puis on pense que l'expérience de Born c'est l'expérience de Young, mais avec des électrons qui sont envoyés un à la fois. »

Élève B : « Le problème c'est qu'on ne voit pas vraiment le lien avec l'histoire que l'onde de la particule ça serait une onde de probabilité. »

Enseignant : « Ok, ok, bon en partant c'est un des concepts les plus abstraits de la physique, donc on va y aller tranquillement. Une particule, ou bien un photon, on dit que ça se comporte aussi comme une onde. Qu'est-ce que vous pensez que ça veut dire ça, une particule qui se comporte comme une onde? »

Élève B : « Il y a une dualité onde-corpuscule. »

Enseignant : « Oui, mais comment ça se peut? Comment une particule peut se comporter à la fois comme une onde puis comme une particule? »

Élève C : « La particule vibre? »

Enseignant : « Bon, ok, on va prendre ça comme modèle. Disons que la particule vibre. Dans ce modèle là, si on envoie une seule particule vers un système de deux fentes comme dans l'expérience de Young, qu'est-ce qui va se passer? »

Élève C : « La particule va avancer en vibrant jusqu'à ce qu'elle atteigne les fentes... elle va passer et puis après elle va aller vers l'écran en vibrant et puis ça va faire un patron d'interférence. »

Élève A : « Ok, on écrit ça. »

Élève B : « On écrit quoi? Ça explique rien ça... »

Enseignant : « Ok l'explication que vous avez donnée c'est que il y a une seule particule qui passe les fentes... et puis ensuite quand elle arrive sur l'écran elle va faire un patron de diffraction. Donc une seule particule donne à elle seule un patron d'interférence? »

Élève B : « Non, ça prend plusieurs particules. Ce sont les points de toutes les particules mis ensemble sur l'écran qui vont faire le patron d'interférence. Si il y a rien qu'une particule, ça va faire un point tout seul sur l'écran. »

Enseignant : « Ok, ce point là, dans le modèle de la particule qui vibre, est-ce qu'il peut être n'importe où sur l'écran? »

Élève B : « Non, Il va être aux endroits où est-ce qu'il y a des franges claires dans la figure d'interférence. C'est pour ça que quand il y en a beaucoup ça fait le patron d'interférence. »

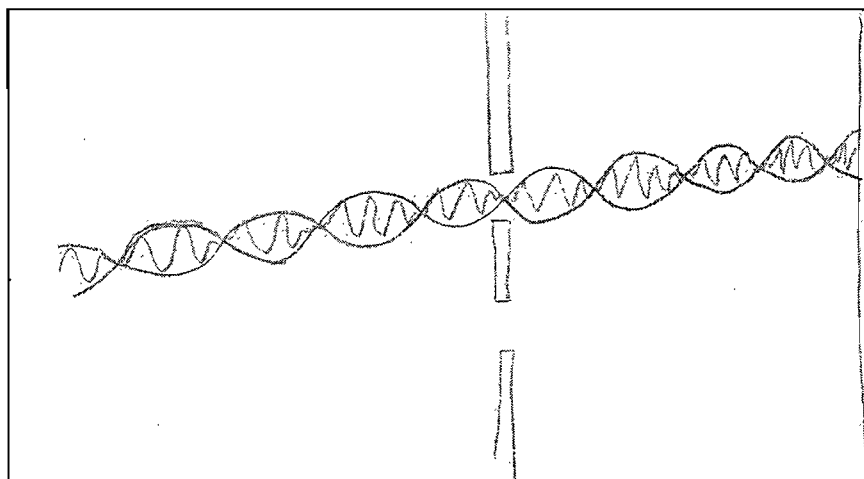
Enseignant : « Ok, d'accord. Mais quand tu dis ça, es-tu en train d'essayer d'appliquer le modèle de la particule qui vibre ou est-ce que tu répètes ce que tu as lu dans la section 5.2? »

Élève A : « Il répète ce qu'il a lu. »

Enseignant : « Bon, ok admettons qu'on veut appliquer le modèle de la particule qui vibre, on pourrait faire un schéma pour voir où la particule pourrait frapper l'écran... »

L'élève C a fait un schéma reproduit à la figure 7

Figure 7 : Schéma représentant une conception intuitive de la dualité onde-corpuscule



Suite à la réalisation du schéma la discussion reprend :

Enseignant : « Ok, maintenant d'après-vous, si on envoie plusieurs électrons un après l'autre de la même façon que sur le schéma là, ça va donner quelle sorte de figure? »

Élève C : « Des petits points un peu n'importe où vis-à-vis l'endroit où le faisceau touche. »

Enseignant : « Bon, puis qu'est-ce qu'on serait supposé d'observer si on se fie à la section 5.2? »

Élève B : « On est supposé d'avoir une figure d'interférence. »

Enseignant : « Ok, maintenant question piège : le schéma dans l'expérience de Young qu'on fait pour représenter l'interférence, de quoi il a l'air? »

Élève A : « On dessine des fronts d'ondes qui passent par les deux fentes et qui interfèrent entre eux après. »

Enseignant : « Ok, des fronts d'ondes, c'est ça. Maintenant, on revient à la dualité onde-corpuscule, la composante ondulatoire c'est quoi? »

Élève C : « Des fronts d'ondes? »

Enseignant : « Quand on dit que l'onde représente la probabilité de trouver la particule à un endroit? »

Élève B : « Les lignes des fronts d'ondes, c'est les maximums de probabilités de la position de la particule? »

Enseignant : « Pas pire, ça s'en vient... Ok, maintenant avec ce modèle là, si on envoie une seule particule, où est-ce qu'elle va frapper sur l'écran? »

Élève B : « Aux endroits où les franges sont claires dans la figure d'interférence... parce que c'est là que c'est le plus probable.»

Dans cette discussion, les élèves se sont initialement ralliés à un modèle de la particule qui vibre pour représenter la dualité onde-corpuscule. L'élève C a dessiné l'enveloppe d'une onde sinusoïdale pour représenter ce modèle. Ce type de représentation est très commun dans les prétest et post-test. Certains vont même jusqu'à mettre un petit point sur l'onde sinusoïdale pour représenter la position du photon. Suite à la réalisation que ce modèle ne permettait pas de prédire les résultats d'expériences, les élèves guidés par l'enseignant ont opté pour un modèle où la composante ondulatoire est représentée par des fronts d'onde et les élèves ont exprimé l'idée que la probabilité de retrouver la particule est maximale aux endroits où il y a un front d'onde, ce qui est à peu près conforme au concept scientifique⁴. La discussion engendrée par l'activité d'investigation historique a donc permis de rapprocher les conceptions de ces élèves des concepts

⁴ La phase de l'onde de probabilité est la même pour tous les endroits qui sont reliés par un front d'onde. Cette phase peut donner un maximum de la fonction d'onde, à ce moment l'affirmation des élèves est exacte. Cependant, la phase peut tout autant donner un résultat quelconque à la fonction d'onde, à ce moment tout ce qu'on pourrait affirmer est que la probabilité de retrouver la particule est la même à tous les endroits reliés par un front d'onde, mais cette probabilité ne serait pas nécessairement maximale.

scientifiques. Cependant, en se référant aux stratégies de changement conceptuel présentées au chapitre 2, il y a de bonnes raisons de penser que ce changement pourrait n'être que temporaire :

- Bien que les élèves aient choisi une nouvelle conception, celle-ci ne rencontre probablement pas les conditions de Posner et Al. La conception est fructueuse, car elle permet d'expliquer les résultats d'une expérience. Par contre le concept d'onde de probabilité est très peu intelligible, il faut l'avoir rencontré à plusieurs reprises avant d'en saisir réellement le sens. De plus ce concept est tellement abstrait qu'il y a de bonnes chances qu'il paraisse peu plausible aux élèves.
- Si on se réfère au modèle allostérique, les apprentissages conceptuels sont caractérisés par des relations multiples entre plusieurs organisations qui peuvent être abordés sous différents angles. Or dans l'activité d'investigation historique, le concept d'onde de probabilité n'a été vu que sous un seul angle, ce qui serait bien insuffisant pour permettre à l'apprenant de concilier les nouvelles connaissances et de produire une nouvelle structuration du savoir.

Évolution des conceptions des membres de deux équipes

Puisque l'activité d'investigation se fait en équipes, il est possible que les conflits sociocognitifs aient eu un rôle à jouer dans le processus de changement conceptuel. Lors de l'analyse des données de recherche, il est apparu intéressant d'estimer l'importance de ce rôle. Cependant, la méthodologie de recherche

n'ayant pas été conçue en vue d'une telle évaluation, on ne peut qu'inférer à partir des rapports de recherche certains éléments des interactions entre les pairs et tenter d'associer ces éléments à une évolution conceptuelle entre le prétest et le post-test.

Parmi les rapports de recherche, les rapports 1 et 2 de deux équipes ont été retenus : l'équipe A formée de Julie, Martin, Luis et Marie, et l'équipe B formée de Rosine, Vincent, Jacynthe et France. Ces deux équipes ont été choisies parce qu'elles étaient hétérogènes : elles étaient formées de membres des deux sexes et dont les résultats scolaires différaient. Les rapports 1 et 2 concernent la vision et les modèles de la lumière utilisés pour expliquer la diffraction de la lumière. Ils ont été choisis parce que les conceptions énoncées aux prétest et post-test par les membres des équipes A et B différaient davantage en fonction de ces sujets.

Conceptions relatives à la vision

Les réponses aux deux premières questions du prétest des membres de l'équipe A montrent que trois membres de l'équipe adhèrent à une conception de la vision qui correspond aux concepts scientifiques actuels.

Tableau 6 Réponses aux questions 1 et 2 de l'équipe A

	Prétest		Post-test	
	Question 1	Question 2	Question 1	Question 2
Julie	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate
Martin	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate
Luis	Conception 1	Conception 1	Conception adéquate	Conception adéquate
Marie	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate	Conception adéquate

Rappel des conceptions relatives à la vision :

Conception 1 : il suffit qu'il y ait présence de lumière dans un espace pour que la vision soit possible.

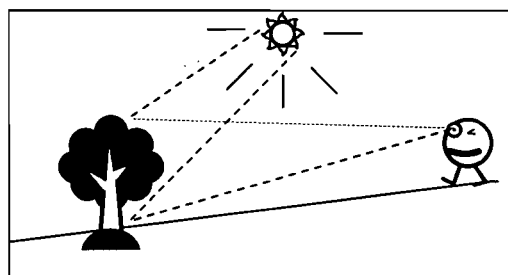
Conception 2 : L'œil a un rôle actif dans le processus de la vision.

Conception 3 : Dans un espace illuminé, les objets émettent de la lumière.

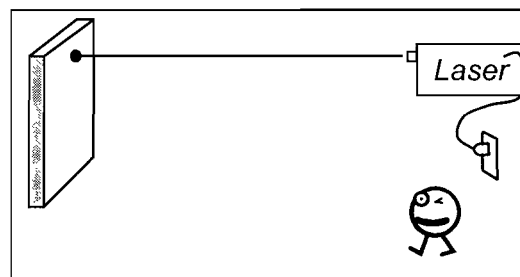
On remarque que les réponses au prétest de Luis se rapprochent plus du modèle de l'Antiquité :

Réponses de Luis aux questions 1 et 2 du prétest

« Les rayons du soleil éclairent l'arbre le rendant observable par le champ de vision de l'observateur à droite du dessin. »



« L'observateur voit un point (ou une petite ligne) qui est établi par le laser (malgré le fait que le laser soit monochrome, il possède une légère diffraction). »



Dans son rapport de recherche 1, l'équipe A explique que selon le modèle d'Alhazen :

« La lumière ne vient pas de l'œil, mais de l'extérieur. »

« La lumière se réfléchit sur les objets et rentre dans l'œil. »

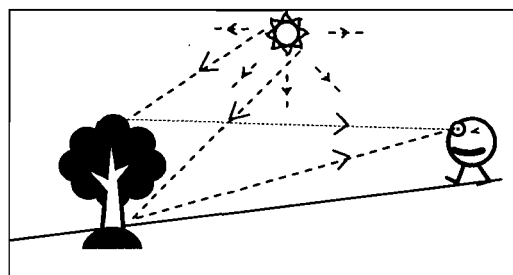
« Il serait impossible de voir la propagation d'un faisceau s'il n'y a pas de lumière provenant du faisceau de lumière qui va dans l'œil. »

(Extrait du rapport de recherche 1 de l'équipe A)

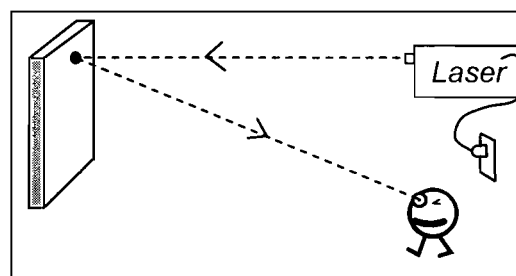
Suite à l'activité de recherche, Luis répond de la façon suivante aux questions 1 et 2 du post-test :

Réponses de Luis aux questions 1 et 2 du post-test

« Selon le modèle d'Alhazen, le soleil va éclairer l'arbre et ce dernier va réfléchir cette lumière qui va arriver à l'œil de l'observateur, donc ce dernier pourra voir. »



« L'observateur va observer le point que le laser émet sur l'écran (si nous ne tenons pas compte de la diffraction du laser). Donc la lumière, comme faisceau, va créer ce point qui va être observé par l'observateur »



L'évolution conceptuelle de Luis est appréciable. Le rapport de recherche 1 de l'équipe porte à croire que l'apport de l'étude des différents modèles de la vision a contribué à cette évolution. Cependant, l'interaction avec les pairs pourrait aussi avoir eu un rôle important à jouer puisque les autres membres de l'équipe adhéraient déjà à un modèle de la vision proche de celui du modèle d'Alhazen.

Les conceptions relatives à la vision de l'équipe B sont plus diverses :

Tableau 7 Réponses aux questions 1 et 2 de l'équipe B

	Prétest		Post-test	
	Question 1	Question 2	Question 1	Question 2
Rosine	<i>Conception 3</i>	<i>Conception 1</i>	<i>Conception 2</i>	<i>Conception 1</i>
Vincent	<i>Conception 3</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>
Jacynthe	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>
France	<i>Conception 3</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>	<i>Conception adéquate</i>

Les conceptions de Rosine ne semblent pas affectées par l'activité d'investigation historique : autant dans son prétest que dans son post-test, Rosine adhère au schème de la vision spontanée. À l'opposé, tant au prétest qu'au post-test, Jacynthe énonce aux questions 1 et 2 des conceptions qu'on pourrait associer au modèle d'Alhazen.

France et Vincent quant à eux montrent une évolution conceptuelle : ils représentent à la question 1 du prétest des rayons émis par l'arbre, ce qui correspond à la *conception 3* définie dans les sections précédentes, alors qu'à cette même question au post-test leur réponse correspond au modèle d'Alhazen.

Il est aussi curieux que, lors du prétest, on observe des réponses qui témoignent de deux conceptions différentes pour un même sujet. Toutefois, ceci est tout à fait possible puisque plusieurs conceptions peuvent coexister et être appelées ou non selon le contexte.

Le rapport de recherche 1 de l'équipe B comporte aussi certaines inconsistances. À certains endroits le modèle d'Alhazen est bien expliqué, comme ci-dessous :

« Chaque point illuminé d'un objet réfléchit les rayons de la lumière dans toutes les directions, mais seulement un rayon de chaque point entre perpendiculairement dans l'œil. » (Extrait du rapport de recherche 1 de l'équipe B)

Par contre un peu plus loin dans le même rapport, encore au sujet du modèle d'Alhazen, on retrouve une affirmation qui semble propre au schème de la lumière corporelle :

« Les rayons de lumière sont des jets de particules. Ces particules reflètent la lumière et peuvent être vues à condition qu'elles pénètrent l'œil perpendiculairement. » (Extrait du rapport de recherche 1 de l'équipe B)

En résumé, concernant les résultats de l'équipe B, deux des membres de l'équipe montrent une évolution conceptuelle appréciable, cependant une élève continue d'adhérer à des conceptions alternatives suite à l'activité d'investigation historique. Le rapport de recherche 1 de l'équipe B nous indique que l'équipe a eu des difficultés à réaliser cette activité sur les modèles de la vision.

Ce rapport de recherche nous amène aussi à nous questionner dans ce cas sur la possibilité que l'interaction avec les pairs puisse avoir nui à la réalisation du rapport. En effet, il est étonnant de constater la divergence des réponses du rapport de recherche alors qu'une personne de l'équipe adhérait déjà avant la recherche à un modèle de la vision conforme au modèle scientifique actuel et que l'évolution conceptuelle de deux membres de l'équipe est appréciable. Dans ce contexte, on peut douter que le conflit sociocognitif ait pu jouer un rôle important dans le processus d'évolution conceptuel des membres de l'équipe B.

Conceptions relatives au modèle de l'optique ondulatoire

À la partie B du prétest et du post-test, on veut vérifier si les élèves reconnaissent dans quelles situations le modèle de l'optique géométrique est adéquat et dans quelles situations le modèle de l'optique ondulatoire est adéquat.

Le tableau ci-dessous indique si les élèves des équipes A et B utilisent le modèle adéquat à chaque situation ou s'ils appréhendent toutes les situations en utilisant le même modèle, soit géométrique, soit ondulatoire.

Tableau 8 Modèles utilisés à la partie B par les membres des équipes A et B

		Prétest	Post-test
Équipe A	Julie	Géométrique	Adéquat
	Martin	Géométrique	Adéquat
	Luis	Ondulatoire	Ondulatoire
	Marie	Adéquat	Adéquat
Équipe B	Rosine	Géométrique	Géométrique
	Vincent	Ondulatoire	Ondulatoire
	Jacynthe	Géométrique	Adéquat
	France	Géométrique	Géométrique

On remarque que les choix de modèles utilisés par trois des membres de l'équipe A sont adéquats suite à l'activité d'investigation historique. Le rapport de

recherche 2 de l'équipe A présente aussi une explication adéquate de l'influence de la grandeur d'une ouverture sur le phénomène de diffraction :

« Pour Huygens, si on diminue la largeur de la fente, les fronts d'ondes deviennent plus sphériques, ce qui fait en sorte que le cône de diffraction s'agrandit. Si on élargi la fente, c'est l'inverse qui se produit : les fronts d'ondes deviennent de plus en plus plans jusqu'à ce que le faisceau soit parallèle. » (Extrait du rapport de recherche 2 de l'équipe A)

Par contre, un seul des membres de l'équipe B, Jacynthe, utilise un modèle adéquat à chacune des situations de la partie B du post-test. Il n'est pas surprenant aussi de constater que dans leur second rapport de recherche, les membres de l'équipe B expliquent la diffraction en faisant intervenir des notions d'optique géométrique.

« Si la largeur de la fente diminue, il y a moins de possibilités d'angle pour les rayons diffractés, alors le cône (de diffraction) devrait s'amincir selon la théorie de Huygens. » (Extrait du rapport de recherche 2 de l'équipe B)

Le concept de rayon étant propre à l'optique géométrique, on doit conclure que dans le cas de l'équipe B, autant l'apport de l'investigation historique que celui de l'interaction avec les pairs ont été inopérants dans le processus de changement conceptuel.

5. Réponses aux questions de recherches

Les sections précédentes de l'analyse permettent de répondre aux trois questions de recherche spécifiques. Nous regroupons dans cette section les éléments de réponses à ces questions. Ces éléments ont en fait déjà été présentés, il s'agit simplement ici de les reprendre afin de répondre directement et de façon concise aux questions de recherche spécifiques. La division des sous-sections qui suivent va de soi : chacune répond à une des questions de recherche spécifiques.

Première question

Quelles sont les conceptions des apprenants sur la nature de la lumière après qu'ils aient suivi un cours d'introduction à l'optique géométrique et à l'optique ondulatoire?

Dans cette recherche, nous avons étudié les conceptions des élèves relatives à la vision et relatives aux modèles de l'optique géométrique, de l'optique ondulatoire et de la dualité onde-corpuscule. Nous répondrons donc à la première question pour chacun de ces sujets.

Vision

Lorsque les élèves doivent expliquer des situations qu'ils ont déjà rencontrées, leurs conceptions récapitulent en général les concepts scientifiques. Seulement quelques réponses impliquent les conceptions 1 et 2 associables au schème de la

vision spontanée (conception 1 : *il suffit qu'il y ait de la lumière dans un espace pour que la vision soit possible*, conception 2 : *l'œil joue un rôle actif dans le processus de vision*).

Par contre, lorsqu'ils doivent expliquer pourquoi le ciel paraît brillant le jour alors que le soleil est caché par un nuage, environ la moitié des élèves expliquent que la lumière se rend tout de même jusqu'à l'œil de l'observateur, soit en passant à travers le nuage soit en se reflétant sur le sol.

Selon cette explication formulée par la moitié des élèves, un endroit, le ciel, paraît brillant parce que de la lumière provenant d'un autre endroit, le nuage ou le sol, atteint l'œil de l'observateur. Cette explication nous a amené à énoncer dans cette recherche la conception 6 : *Lorsque de la lumière atteint l'œil d'un observateur, alors tout endroit que l'observateur regarde paraît illuminé.*

Dans la même situation, les conceptions exprimées par un autre tiers des élèves expliquent que le ciel paraît brillant parce que de la lumière s'y propage. Cette explication a été associée à la conception 7 : *un endroit paraît illuminé lorsque des rayons de lumière s'y propagent.*

Les conceptions 6 et 7 semblent attribuer un rôle actif à l'œil. Rappelons toutefois que les élèves n'adhèrent à ces conceptions que lorsqu'ils doivent expliquer une situation qui leur est moins familière, qu'ils n'arrivent pas à expliquer avec les

concepts scientifiques qu'ils connaissent. Le fait que les conceptions 6 et 7 apparaissent dans des situations moins familières aux élèves n'est pas entièrement surprenant. Il s'agit d'une caractéristique des conceptions initiales qui a été présentée au chapitre 2 : les modèles enseignés sont mobilisés dans les situations scolaires alors que les conceptions initiales servent à appréhender les situations connues et nouvelles. On en déduit donc que pour certains élèves, les conceptions initiales, les schèmes de la vision spontanée et de la lumière corporelle, coexistent avec les concepts scientifiques de la vision.

Optique géométrique et optique ondulatoire

Le prétest montre que les élèves ont de la difficulté avec les concepts scientifiques associés à la nature ondulatoire de la lumière. À la partie B, la moitié des élèves ne réalisent pas que, dans la dernière situation, à un certain moment les limites d'application du modèle de l'optique géométrique vont être atteintes et qu'en conséquence les prédictions du modèle seront fausses.

À la partie C, le modèle de l'optique ondulatoire de plusieurs élèves semble être un modèle hybride formé de concepts de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire. Ce modèle est caractérisé par les quatre conceptions suivantes :

Conception 8 : *un patron de diffraction est une image projetée à partir d'une ouverture.*

Conception 9 : *la diffraction de la lumière se produit seulement lorsque la lumière passe par une ouverture qui est plus petite que sa longueur d'onde.*

Conception 10 : *la lumière ne peut passer une ouverture si la largeur de l'ouverture est plus petite que la longueur d'onde de la lumière.*

Conception 12 : *le patron d'interférence obtenu par l'interférence de la lumière provenant de deux ouvertures est la superposition des patrons provenant de chacune des ouvertures.*

Dualité onde corpuscule

Lorsqu'ils ont répondu à la question 10 du prétest, la plupart des élèves n'ont pas fait appel à la nature corpusculaire de la lumière. Pour cette question, il avait été choisi de ne pas suggérer de modèle de la lumière. On cherchait ainsi à vérifier si les élèves allaient de prime abord réaliser que la nature corpusculaire de la lumière pouvait avoir une importance pour répondre à la question. Les réponses ont bien démontré que non : seulement huit élèves sur quatre-vingt pensent à la nature corpusculaire de la lumière. Dans ces huit réponses, les élèves n'expriment pas de conceptions non scientifiques. Trois élèves ont formulé la réponse attendue alors que cinq ont abordé la nature corpusculaire de la lumière mais n'ont pas réalisé qu'il était possible qu'un seul photon soit envoyé à la fois.

Deuxième question

Comment ont évolué les conceptions des apprenants sur la nature de la lumière après la réalisation de l'investigation historique?

Les comparaisons faites entre les conceptions que les élèves ont exprimées lors des prétest et post-test peuvent nous permettre de répondre à la seconde question de recherche spécifique.

Vision

Concernant la vision dans des situations que les élèves ont déjà rencontrées, qui concernent les questions 1 et 2, on ne remarquait au prétest que quelques conceptions alternatives. Au post-test, environ le tiers des élèves qui formulaient ces conceptions alternatives ont formulé des réponses conformes aux concepts scientifiques actuels.

Par contre, les conceptions 6 et 7 qu'on retrouve à la question 3 ne semblent pas affectées par la réalisation de l'investigation historique. Les résultats du prétest nous avaient permis d'affirmer que la présence des conceptions 6 et 7 à la question 3 était due à une coexistence de conceptions initiales avec le modèle enseigné de la vision. Comme les conceptions 6 et 7 demeurent, on en déduit que l'investigation historique a permis de consolider le modèle enseigné de la vision pour les

situations déjà rencontrées mais n'a pas permis de modifier les conceptions initiales de la vision qui coexistent chez certains élèves avec le modèle enseigné.

Optique géométrique et optique ondulatoire

C'est en regard de la nature ondulatoire de la lumière qu'on remarque la plus grande influence de l'activité d'investigation historique. À la section B, au prétest seulement 10 élèves choisissaient le bon modèle pour chaque situation, alors qu'au post-test 25 élèves choisissent le bon modèle à chaque situation. On remarque par contre que le nombre d'élèves qui utilisent le modèle de l'optique ondulatoire de façon inappropriée aux questions 4 et 5 augmente aussi, alors que le nombre d'élèves qui utilisent le modèle de l'optique géométrique à la question 6 décroît. En fait, plusieurs élèves qui utilisaient uniquement le modèle de l'optique géométrique à la section B pour appréhender toutes les situations, délaissent ce modèle pour adopter le modèle de l'optique ondulatoire pour toutes les situations.

Au niveau des conceptions énoncées par les élèves à la section C, on remarque que l'incidence des conceptions 8 et 12 diminue beaucoup. Les élèves semblent donc se détacher de l'idée que les patrons de diffraction et d'interférence sont des images projetées à partir d'une ou de plusieurs ouvertures. Ces conceptions, issues d'un modèle hybride de l'optique ondulatoire et géométrique, semble être délaissées aux questions 7 et 9 au profit de conceptions plus proches des concepts scientifiques.

Par contre, à la question 8, l'incidence des conceptions 9 et 10 ne semblent pas affectée. La question 8 demande de comprendre l'origine du phénomène de diffraction, c'est-à-dire ce qui fait qu'une onde plane qui passe par une ouverture peut devenir une onde sphérique. Cette origine semble être encore difficile à saisir pour plusieurs élèves, et ce malgré que lors de la recherche 2 de l'investigation historique les élèves aient du décrire comment Newton et Huygens expliquaient l'origine du phénomène de diffraction.

Dualité onde corpuscule

Au post-test, il y a moins d'élèves confus face à la question 10 qu'il y en avait au prétest. Toutefois, le nombre de réponses correctes n'augmente pas beaucoup, c'est plutôt le nombre d'élèves qui choisissent de répondre à la question en se basant sur le modèle ondulatoire uniquement qui augmente, comme le montre la figure 6 à la page 120.

Troisième question

Lors de l'investigation historique, peut-on identifier des situations où les élèves remettent en question leurs conceptions? Peut-on associer le processus de changement conceptuel alors observé à l'un ou l'autre des modèles de changement conceptuels?

Les enregistrements recueillis lors de l'investigation historique ont permis d'identifier deux situations où il semble y avoir eu un changement conceptuel. Dans le processus qui a mené à ce changement conceptuel, l'interaction, l'échange et l'argumentation avec des pairs semblent avoir joué un rôle déterminant. L'élément à l'origine de la remise en question des conceptions initiales serait donc d'ordre sociocognitif.

Par contre dans ce processus de changement conceptuel, l'enseignant a aussi joué un rôle important, celui de médiateur, lors de ces deux situations. Or l'activité d'investigation historique proposée par cette recherche doit pouvoir se réaliser sans la médiation de l'enseignant. Comme dans un contexte d'enseignement, l'enseignant ne peut intervenir auprès de toutes les équipes, l'activité d'investigation historique ne peut être utile comme outil d'enseignement que si les échanges à l'intérieur des équipes, sans l'enseignant, sont fructueux et susceptibles d'amener les élèves vers une évolution de leurs conceptions.

Lors de cette recherche, il est possible que les échanges à l'intérieur des équipes aient contribué à l'évolution conceptuelle de certains élèves, puisqu'il y a des différences entre les conceptions énoncées au post-test et au prétest. Toutefois les données de la recherche ne nous permettent pas de confirmer cette hypothèse. L'évolution conceptuelle observée pourrait aussi être due au travail individuel des élèves en préparation à l'activité ou lors de l'activité.

Conclusion

Le but de cette recherche est d'explorer l'utilisation d'une activité d'investigation historique et d'évaluer son apport à l'apprentissage de concepts scientifiques.

Rappelons la question générale de recherche :

Quels apports l'investigation historique de l'évolution des modèles de la lumière a-t-elle sur les conceptions associées à la nature de la lumière chez les élèves du programme de sciences de la nature au niveau collégial?

Pour cette recherche, nous avons étudié les conceptions de la nature de la lumière sous les aspects associés à la vision, à la nature ondulatoire et à la dualité onde-corpuscule de la lumière. Nous avons trouvé que :

- Pour des questions sur la vision qui sont familières aux élèves, bien que les conceptions de la plupart des élèves soient déjà généralement conformes aux concepts scientifiques, l'investigation historique réduit l'incidence de conceptions associées au schème de la lumière corporelle et au schème de la vision spontanée.
- Chez certains élèves, le schème de la vision spontanée coexiste avec un modèle de la vision enseigné. L'activité d'apprentissage n'a pas eu d'influence sur cette coexistence.

- Plusieurs élèves expliquent la nature ondulatoire de la lumière en utilisant un modèle hybride qui fait appel à des concepts de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire. L'investigation historique réduit l'incidence des conceptions associées à ce modèle hybride.
- Les élèves ont beaucoup de difficultés à formuler une explication du phénomène de diffraction de la lumière qui soit conforme aux concepts scientifiques. Ces difficultés demeurent suite à l'investigation historique.
- Bien qu'ils connaissent l'existence du modèle de la dualité onde corpuscule, les élèves ne pensent pas spontanément à utiliser ce modèle. Suite à l'investigation historique, quelques élèves réalisent plus spontanément que ce modèle peut être nécessaire dans certaines conditions.
- Lorsqu'un enseignant a agi comme médiateur dans les discussions d'équipes pendant l'investigation historique, les interactions sociales ont favorisé l'évolution conceptuelle des élèves.

Les apports de l'investigation historique n'ont donc pas modifié toutes les conceptions alternatives associées à la nature de la lumière des élèves. Toutefois, il y a eu certains changements intéressants, principalement associés aux conceptions relatives à la nature ondulatoire de la lumière. Ces changements permettent de supposer que l'apport de l'histoire des sciences peut favoriser

l'apprentissage des sciences et que le développement d'outils en ce sens serait bénéfique à l'enseignement des sciences au niveau collégial québécois.

Il faut toutefois demeurer prudent face à ces conclusions. Bien que l'échantillon de recherche ait été assez large, il est tout de même peu diversifié. De plus l'activité d'investigation historique a été d'une durée relativement courte (quatre périodes de 50 minutes). Aussi, il n'est pas certain que les conclusions de cette recherche soient généralisables à toutes les situations d'enseignement des sciences.

Suite à cette recherche, plusieurs perspectives sont envisageables afin de développer et d'évaluer des outils intégrant l'histoire des sciences à leur enseignement. La formule de l'investigation historique pourrait être revue. L'investigation historique que nous avons faite portait sur plusieurs aspects de la nature de la lumière. Il serait possible de cibler plus précisément certains concepts scientifiques et de faire une activité d'apprentissage plus détaillée. Ces concepts n'ont pas nécessairement à être reliés à la nature de la lumière. Seulement en physique au niveau collégial, plusieurs autres domaines posent des problèmes conceptuels aux élèves. On peut penser par exemple à plusieurs concepts associés à l'électricité et au magnétisme : potentiel électrique, champ électrique et champ magnétique, induction électromagnétique, etc. Une activité plus détaillée permettrait aussi d'aborder les concepts scientifiques sous différents angles. Ces différentes approches pourraient aider à la consolidation des nouvelles conceptions. Selon le modèle allostérique (Giordan, 1989), en mettant l'accent sur

les interrelations qui existent entre les concepts scientifiques, on favoriserait la conciliation des conceptions des élèves. D'autre part, afin de mettre en évidence les faiblesses des conceptions initiales des élèves, la stratégie du conflit sociocognitif pourrait être explorée davantage. Toutefois, dans l'élaboration de cette stratégie, il ne faut pas oublier les contraintes de l'enseignement : l'enseignant ne peut jouer un rôle de médiateur, il ne peut qu'intervenir au besoin dans le travail des élèves. La méthodologie d'une future recherche sur l'apport de l'histoire des sciences basée sur la stratégie du conflit sociocognitif devrait aussi prévoir des outils de recherche qui permettent d'évaluer l'importance du rôle du conflit sociocognitif et des interactions entre les pairs dans le processus de changement conceptuel. Finalement, comme les cours de sciences comportent toujours une certaine composante de travail expérimental, ce travail pourrait être fait en lien avec l'activité d'apprentissage basée sur l'histoire des sciences. Le travail expérimental serait alors inspiré d'expériences historiques. De cette façon, le travail expérimental pourrait jouer un rôle afin de créer une insatisfaction par rapport aux conditions initiales ou afin de mobiliser les conceptions que les élèves auraient développées.

Bibliographie

Abd-El-Khalick & Lederman, N. G. (2000). The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (10), 1057-1095.

Allchin, D. (2003). Scientific Myth-Conceptions. *Science & Education*, 87 (3), 329-351.

Ambrose, B. S., Shaffer, P. S., Steinberg, R. N., McDermott, L. C. (1998). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67 (2), 146-155.

American Association for the Advancement of Science (1989). *Project 2061: Science for All Americans*. AAAS, Washington, DC.

Astolfi, J.-P. (1997). *L'erreur un outil pour enseigner*. ESF Éditeur.

Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y. ; Toussaint, J. (1997). *Mots clés de la didactique des sciences*. De Boeck Université.

Aylwin, U. (1994). Le travail en équipe, pourquoi et comment? *Pédagogie collégiale*, 7 (3), 28-32.

Benson, H. (2005). *Physique 1: Mécanique*. 3^e éd., Montréal, Édition du renouveau pédagogique.

Benson, H. (2005). *Physique 2: Électricité et magnétisme*. 3^e éd., Montréal, Édition du renouveau pédagogique.

Benson, H. (2005). *Physique 3: Ondes optique et physique moderne*. 3^e éd., Montréal, Édition du renouveau pédagogique.

Brush, S.G. (1989). History of science and science education. *Interchange*, 20 (2), 60-70.

Bybee R. W., Powell, J. C., Ellis, J. D., Giese, J.R., Parisi, L. & Singleton, L. (1991). Integrating the history and Nature of Science and Technology in Science and Social Studies Curriculum. *Science Education*, 75 (1), 143-155.

Chalmers, A. F. (1982). *Qu'est -ce que la science?* 2e éd, La Découverte.

Conseil de la science et de la technologie (2002). *La culture scientifique et technique au Québec: Bilan*. Sainte-Foy, Conseil de la science et de la technologie.

Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science and programming. *Review of Research in Education*, 16, 3-56.

Dedes. C. (2005). The Mechanism of Vision : Conceptual Similarities between Historical Models and Childrens's Representations. *Science Education*, 14 (7&8), 699-712.

Larochelle, M., Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Sainte-Foy, Les presses de l'Université Laval.

Désautels, J. (1999). L'idéologie antédiluvienne du nouveau programme des sciences de la nature et l'éducation à la citoyenneté. *Pédagogie collégiale*, 13 (2).

Dionne, B., Bourque, C., Corneau, M. Côté, M., Gagné, S., Gingras, M., Lemelin, M., Masse, P. & Roux, I.. (1998). *Pour réussir: Guide méthodologique pour les études et la recherche: Sciences de la nature*. Laval, Édition Études Vivantes.

DiSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10 (2&3), 105-225.

Duit, R. (1992). Students' conceptual frameworks: Consequences for learning science. Dans S.M. Glynn, R.H. Yeany et B.K. Britton, *The psychology of Learning Science*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.

Duit, R. (1999). Conceptual change approaches in science education. Dans Schnotz, W., Vosniadou, S. and Carretero, M. (Eds.) *New perspectives on conceptual change*. Amsterdam, Pergamon, 263-282.

Fetherstonhaugh, A. Happs, J., Treagust, D. (1987). Student misconceptions about light: a comparative study of prevalent views found in Werstern Australia, France, New Zealand, Sweden and the United States. *Research in Science Education*, 17, 156-164.

Galili, I. Hazan, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22, 57-88.

Galili, I. Hazan, A. (2001). The Effect of a History-Based Course in Optics on Students' Views about Science, *Science & Education*, 10, 7-32.

Godin, B. (1994). *Le rôle de l'école dans la culture scientifique et technologique. Éléments de réflexion pour alimenter un débat épistémologique et social*. C. d. l. s. e. d. l. technologie, gouvernement du Québec, 17-26.

Giordan, A. (1989), Vers un modèle didactique d'apprentissage allostérique. Dans Bednarz, N. et Garnier, C., *Construction des savoirs*. Ottawa, Agence d'Arc.

Halliday, R., Resnick, R. & Walker, J. (2003). *Physique 1: mécanique*. Chenelière McGraw-Hill.

Halliday, R., Resnick, R. & Walker, J. (2003). *Physique 2: électricité et magnétisme*. Chenelière McGraw-Hill.

Halliday, R., Resnick, R. & Walker, J. (2003). *Physique 3: ondes, optique et physique moderne*. Chenelière McGraw-Hill.

Harvard Project Physics. (1975). *Project physics : text and handbook / directors F. James Rutherford, Gerald Holton, Fletcher G. Watson*. New York ;Toronto, Holt, Rinehart, Winston.

Irwin, A. R. (2000). Historical Case Studies: Teaching the Nature of Science in Context. *Science Education*, 84, 5-26.

Kuhn, T.S. (1962) *The structure of scientific revolutions*. Chicago. University of Chicago Press. Traduction utilisée: Kuhn, T.S. (1983). *La structure des revolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.

Le Moigne, J.-L. (1999). *Les épistémologies constructivistes*. 2e éd., Paris, PUF.

Lemeignan, G. et Weil-Barais, A. (1994). A developmental approach to cognitive change in mechanics. *International Journal of science Education*, 16 (1), 99-120.

Masson, S. (2005). *Effet de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel en sciences*. Université de Montréal, Faculté des études supérieures. 138 p.

Matthews, M. R. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York, Routledge.

Matthews, M.R. (2004). Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned? *Science & Education*, 1, 90-118.

Matthews, M. R., C. Gauld, et al. (2004). The Pendulum: Its Place in Science, Culture and Pedagogy. *Science & Education*, 13 (4-5), 261-277.

Ministère de l'Éducation du Québec (1998). *Sciences de la nature : programme d'études préuniversitaires 200.B0*. Direction de l'enseignement collégial, 91 p.

Monk, M., Osborne, Jonathan (1997). Placing the History and Philosophy of science on the Curriculum: A Model for the Development of Pedagogy. *Science Education*, 81, 404-425.

Nersessian, N. J. (1991). Conceptual change in science and in science education. Dans M.R. Matthews (ed.) *History, philosophy and science teaching: selected readings*. Toronto, Teachers College Press, 126-142.

Nussbaum, J., Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11, 183-200.

Ouellet, L., Gilbert, L. (1997). L'apprentissage et l'enseignement des sciences et des mathématiques dans une perspective constructiviste. *Éducation et francophonie*, XXV, 1, disponible sur internet à :
www.acelf.ca/c/revue/revuehtml/25-1/rxxv1-04.html

Piaget (1975). *L'équilibration des structures cognitives. Problème central du développement*. Presse universitaire de France, Paris.

Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. Thèse, Université de Montréal.

Posner, G.J. Strike, K. A., Hewson, P. W. & William A. Gertzog (1982). Accomodation of a scientific conception: toward a theory on conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.

Schwartz, R. S., Lederman, N. G. & Crawford, B. A. (2004). Developing Views of Nature of Science in an Authentic Context: An Explicit Approach to Bridging the Gap Between Nature of Science and Scientific Inquiry. *Science Education*, 88 (4), 610-645.

Serouglou, F., Koumaras, P. (2001). The Contribution of the History of Physics in Physics Education: A Review. *Science & Education*, 10, 153-172.

Sequeria, M. & Leite, L. (1991). Alternative conceptions and history of science in physics teacher education. *Science Education*, 75 (1), 46-56.

Serway, R. A. (1996). *Physique 1: mécanique*. 4^e éd., Laval, Éditions Études Vivantes.

Serway, R. A. (1996). *Physique 2: électricité et magnétisme*. 4^e éd., Laval, Éditions Études Vivantes.

Serway, R. A. (1996). *Physique 3: ondes, optique et physique moderne*. 4^e éd., Laval, Éditions Études Vivantes.

Simard, J.-C. (2002). Histoire des sciences et pédagogie. *Pédagogie collégiale*, 16, 4-12.

Stahl, Robert J. (1994). The Essential Elements of Cooperative Learning in the Classroom. ERIC Clearinghouse for Social Studies/Social Science Education. ED370881, disponible sur Internet à : www.ericdigests.org/1995-1/elements.htm

Stinner, A., B. A. McMillan, et al. (2003). The Renewal of Case Studies in Science Education. *Science & Education*, 12, 617-643.

Stinner, A. and H. Williams (1998). History and Philosophy of Science in the Science Curriculum. Dans *International Handbook of Science Education*. B. J. F. a. K. G. Tobin, Kluwer Academic Publisher, 1027-1045.

Strike, K. A., Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Dans R. Duschl, R. Hamilton, *Philosophy of science, cognitive science and educational theory and practice*, Albany, Suny Press.

Thouin, M. (2004). Explorer l'histoire des sciences et des techniques: activités, exercices et problèmes, Éditions Multimonde.

Tsai, CC (2005). Research and trends in science education from 1998 to 2002: a content analysis of publication in selected journals, *International Journal of Science Education*, 27 (1), 3-14.

Van Der Maren, Jean-Marie (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation*. 2^e éd., De Boeck Université.

Vermesh, Pierre (2003). *L'entretien d'explicitation*. 4^e éd., ESF Éditeur.

Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *International Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.

Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions on science. Dans D. L. Gabel (ed.), *Handbook of research on science teaching and learning*. New York, Macmillan, 177-210.

Watts, D.M. (1985). Students' conceptions of light : A case study. *Physics Education*, 20, 183-187.

Annexe 1 :

Formulaires utilisés pour les rapports de recherches

Recherche 1 -

Du modèle de la vision de l'Antiquité au modèle de l'optique géométrique

Directeur de recherche : _____
 Secrétaire : _____
 Recherchiste 1 : _____
 Recherchiste 2 : _____

Note importante :

Vous devez changer de rôle à chaque recherche et ne pouvez occuper un rôle que vous avez déjà occupé.

Directives

Le directeur lit les questions et demande l'avis des recherchistes.

Les recherchistes répondent aux questions en montrant sur quelles références ils s'appuient pour répondre.

Si la réponse semble correcte, le directeur l'accepte et le secrétaire peut l'écrire.

Évidemment, puisque le secrétaire a le crayon, c'est lui qui a le dernier mot et, s'il n'est pas d'accord avec une réponse, il peut refuser de l'écrire! À ce moment, c'est aux recherchistes à défendre leur réponse ou à changer d'avis...

1. Compléter le tableau 1 en identifiant parmi les sujets suivants celui ou ceux qui était(ent) abordé(s) par chacun des personnages historiques, et en détaillant les positions ou la nature des travaux de chaque personnages relatives aux sujets identifiés.

Sujets :

- a) vision
- b) réflexion,

- c) réfraction,
- d) diffraction,

- e) interférence,
- f) effet photoélectrique.

Tableau 1

Personnage	Sujets abordés	Position ou nature des travaux
Empédocle		

Euclide		
Héron d'Alexandrie		
Ptolémée		
Alhazen		

2. Selon vous, pour quelles raisons le modèle de la lumière de Alhazen a-t-il été préféré au modèle de la vision de l'Antiquité?

[illegible]

3. Un masque comportant une ouverture circulaire de 1 cm de diamètre est placé très près d'une ampoule. Un écran est placé à une certaine distance derrière le masque. En appliquant à la lumière les axiomes d'Euclide, comment l'image obtenue sur l'écran sera affectée si on éloigne l'ampoule? (faites un schéma)

4. Un observateur regarde un bel arbre par une magnifique journée ensoleillée. Quel est le rôle du soleil selon le modèle d'Empédocle et selon le modèle d'Alhazen?

Empédocle :

Alhazan :

5. Le jour, même si on ne regarde pas vers le soleil, ou si le soleil est caché, le ciel est brillant. Expliquer cette brillance du ciel selon le modèle de Empédocle et selon le modèle de Alhazen.

Empédocle :

Alhazan :

6. Selon le modèle de la vision d'Empédocle, serait-il possible de voir la propagation d'un faisceau de lumière dans l'espace? Commentez en vous basant sur le modèle d'Empédocle.

7. Est-ce la même réponse si on utilise le modèle de la vision d'Alhazen? Commentez

Recherche 2 – L’optique des 17^{ième} et 18^{ième} siècle : le débat entre corpusculaire ou ondulatoire

Directeur de recherche : _____
 Secrétaire : _____
 Recherchiste 1 : _____
 Recherchiste 2 : _____

Note importante : Vous devez changer de rôle à chaque recherche et ne pouvez occuper un rôle que vous avez déjà occupé.

Le directeur lit les questions et demande l’avis des recherchistes.

Les recherchistes répondent aux questions en montrant sur quelles références ils s’appuient pour répondre.

Si la réponse semble correcte, le directeur l’accepte et le secrétaire peut l’écrire.

Évidemment, puisque le secrétaire a le crayon, c’est lui qui a le dernier mot et, s’il n’est pas d’accord avec une réponse, il peut refuser de l’écrire! À ce moment, c’est aux recherchistes à défendre leur réponse ou à changer d’avis...

1. Compléter le tableau 2 en identifiant parmi les sujets suivants celui ou ceux qui était(ent) abordé(s) par chacun des personnages historiques, et en détaillant les positions ou la nature des travaux de chaque personnages relatives aux sujets identifiés.

Sujets :

- a) réflexion,
- b) réfraction,

- c) diffraction,
- d) inflexion

- e) interférence,
- f) vitesse de la lumière.

Tableau 2

Personnage	Sujets abordés	Position ou nature des travaux
Descartes		
Grimaldi		
Römer		

Huygens		
Newton		
Young		
Fresnel		
Fiseau		

2. Décrivez comment les modèles de Huygens et de Newton expliquent la réfraction. (Pour Newton le schéma est déjà complété!!!)

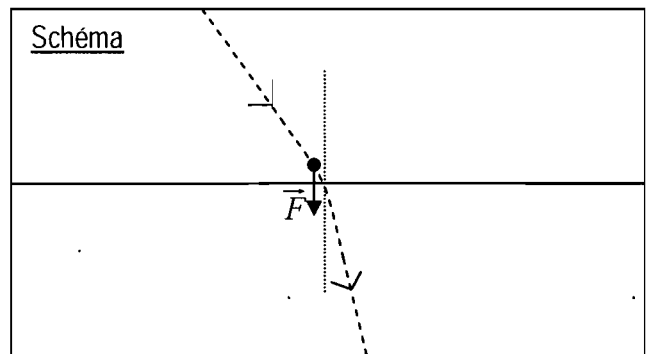
Huygens :

Schéma



Newton :

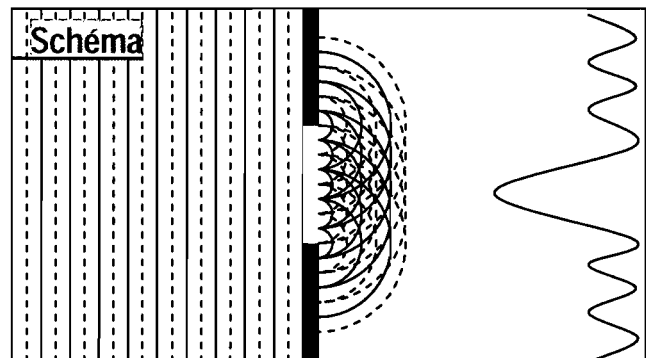
Schéma



3. Décrivez comment les modèles de Huygens-Fresnel et de Newton expliquent la diffraction ou l'inflexion. (Les schémas sont déjà complétés!!!)

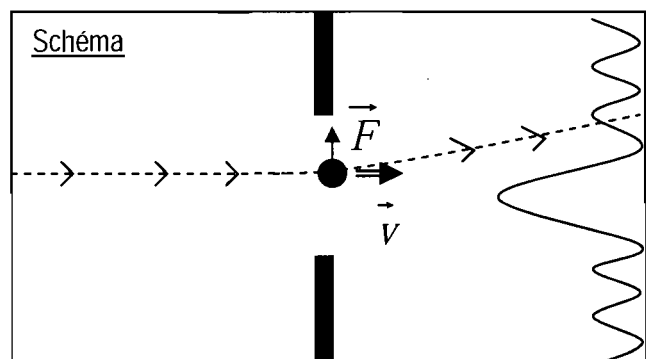
Huygens - Fresnel :

Schéma



Newton :

Schéma



4. Newton supposait que l'inflexion des rayons de lumière, comme la réfraction, était due à des forces entre la matière et les particules de lumière.

a) Quelle était la relation supposée par Newton entre la grandeur de ces forces et la distance entre la matière et les corpuscules de matière.

b) Si on diminue la largeur de la fente dans un montage de diffraction, selon le modèle de Newton, le cône formé par la lumière diffractée devrait-il s'élargir ou s'amincir? Commentez.

c) Est-ce la même réponse si on utilise le modèle de la diffraction de Huygens? Commentez.

5. Young montre clairement que les franges observées dans ses expériences sont le résultat de l'interférence de la lumière. Comment fait-il cette démonstration?

6. Grimaldi effectue des expériences de diffraction avec de la lumière blanche, décrivez les franges qu'il observe.

7. Pourquoi les résultats sur la vitesse de la lumière obtenus par Fizeau sont-ils un argument en faveur de la théorie ondulatoire?

Recherche 3 – L’optique du 20^{ième} siècle : de l’onde électromagnétique au photon

Directeur de recherche : _____
 Secrétaire : _____
 Rechercheur 1 : _____
 Rechercheur 2 : _____

Note importante : Vous devez changer de rôle à chaque recherche et ne pouvez occuper un rôle que vous avez déjà occupé.

Le directeur lit les questions et demande l’avis des chercheurs.

Les chercheurs répondent aux questions en montrant sur quelles références ils s’appuient pour répondre.

Si la réponse semble correcte, le directeur l’accepte et le secrétaire peut l’écrire.

Évidemment, puisque le secrétaire a le crayon, c’est lui qui a le dernier mot et, s’il n’est pas d’accord avec une réponse, il peut refuser de l’écrire! À ce moment, c’est aux chercheurs à défendre leur réponse ou à changer d’avis...

1. Compléter le tableau 2 en identifiant parmi les sujets suivants celui ou ceux qui était(ent) abordé(s) par chacun des personnages historiques, et en détaillant les positions ou la nature des travaux de chaque personnages relatives aux sujets identifiés.

Sujets :

a) Rayonnement du corps noir

b) éther

d) vitesse de la lumière.

c) effet photoélectrique

Tableau 3

Personnage	Sujets abordés	Position ou nature des travaux
Maxwell		
Planck		
Einstein		
De Broglie		

Feynman		
---------	--	--

2. Le modèle de l'onde électromagnétique remplace le modèle de l'onde mécanique transverse se propageant dans l'éther tel que proposé par Fresnel. Identifiez une raison pour laquelle le modèle de l'onde électromagnétique est préférable à celui de l'onde se propageant dans l'éther.

3. Les ondes produites par les oscillateurs électromagnétiques utilisés par Hertz ne sont pas de la lumière, ce sont des ondes radio (les fréquences électriques les plus rapide que l'on pouvait alors produire était de l'ordre de 10^9 Hz). Comment alors Hertz peut-il déduire que les ondes électromagnétiques et la lumière sont de même nature?

4. Expliquer pourquoi le modèle de l'onde électromagnétique est insuffisant pour décrire la lumière?

5. Connaissez vous Max Born?...

Max Born

Max Born était troublé par l'idée que l'onde qui représente une particule puisse subir une diffraction et être scindée. Au printemps 1926, Born proposa que l'onde associée à une particule est une fonction de probabilité, un onde d'information qui ne nous dit pas où la particule est, mais seulement où il est probable qu'elle soit.

Quelle expérience (à l'époque uniquement théorique) incite Max Born à suggérer que l'onde d'une particule est une onde de probabilité? Expliquer cette expérience (voir la section 5.2 de *Physique xxi volume C* pour vous aider).

Recherche 4 –Les plus importantes contributions aux modèles de la lumière

Directeur de recherche : _____
 Secrétaire : _____
 Recherchiste 1 : _____
 Recherchiste 2 : _____

Note importante :

Vous devez changer de rôle à chaque recherche et ne pouvez occuper un rôle que vous avez déjà occupé.

Directives

Le directeur lit les questions et demande l'avis des recherchistes.

Les recherchistes répondent aux questions en montrant sur quelles références ils s'appuient pour répondre.

Si la réponse semble correcte, le directeur l'accepte et le secrétaire peut l'écrire.

Évidemment, puisque le secrétaire a le crayon, c'est lui qui a le dernier mot et, s'il n'est pas d'accord avec une réponse, il peut refuser de l'écrire! À ce moment, c'est aux recherchistes à défendre leur réponse ou à changer d'avis...

Parmi l'ensemble des contributions évaluées dans les trois recherches précédentes, identifiez-en cinq qui selon vous se démarquent des autres. Pour faire votre choix, vous pouvez vous baser par exemple sur :

- l'influence qu'ont eu ces contributions sur le développement des modèles de la lumière,
- le génie scientifique nécessaire pour faire ces contributions,
- la rigueur scientifique des travaux qui ont mené à ces contributions,
- le contexte historique et la difficulté supplémentaire que celui-ci peut avoir posée face au développement des modèles de la lumière.

Indiquez ensuite ces contributions en ordre d'importance dans le tableau 4.

Tableau 4 – Contributions aux modèles de la lumière en ordre d'importance

Personnage à l'origine de la contribution	Nature de la contribution

Ensuite, pour les deux premières contributions, complétez les pages suivantes.

Contribution 1 Personnage à l'origine de cette contribution : _____

Description scientifique de cette contribution :

Portée ou influences de cette contribution sur les modèles de la lumière :

Contexte historique dans lequel s'est fait cette contribution :

Raisons pour lesquelles vous choisissez cette contribution :

Contribution 2 Personnage à l'origine de cette contribution : _____

Description scientifique de cette contribution :

Portée ou influences de cette contribution sur les modèles de la lumière :

Contexte historique dans lequel s'est fait cette contribution :

Raisons pour lesquelles vous choisissez cette contribution :

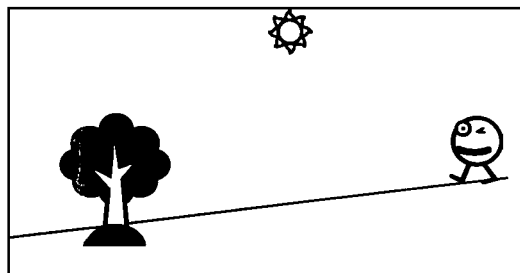
Annexe 2 :

Pré – test et post - test

TEST SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Partie A

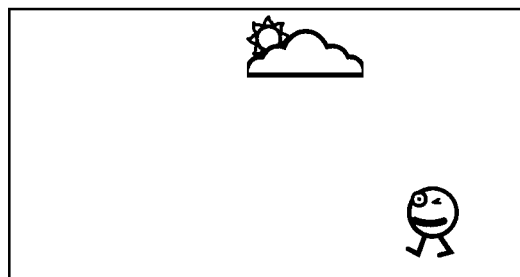
1. Considérer la situation ci-contre. L'observateur à droite du dessin voit l'arbre. Comment cela est-il possible? Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.



2. Considérer la situation ci-contre.
Un laser émet un faisceau en direction de l'écran. Que voit l'observateur? Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.

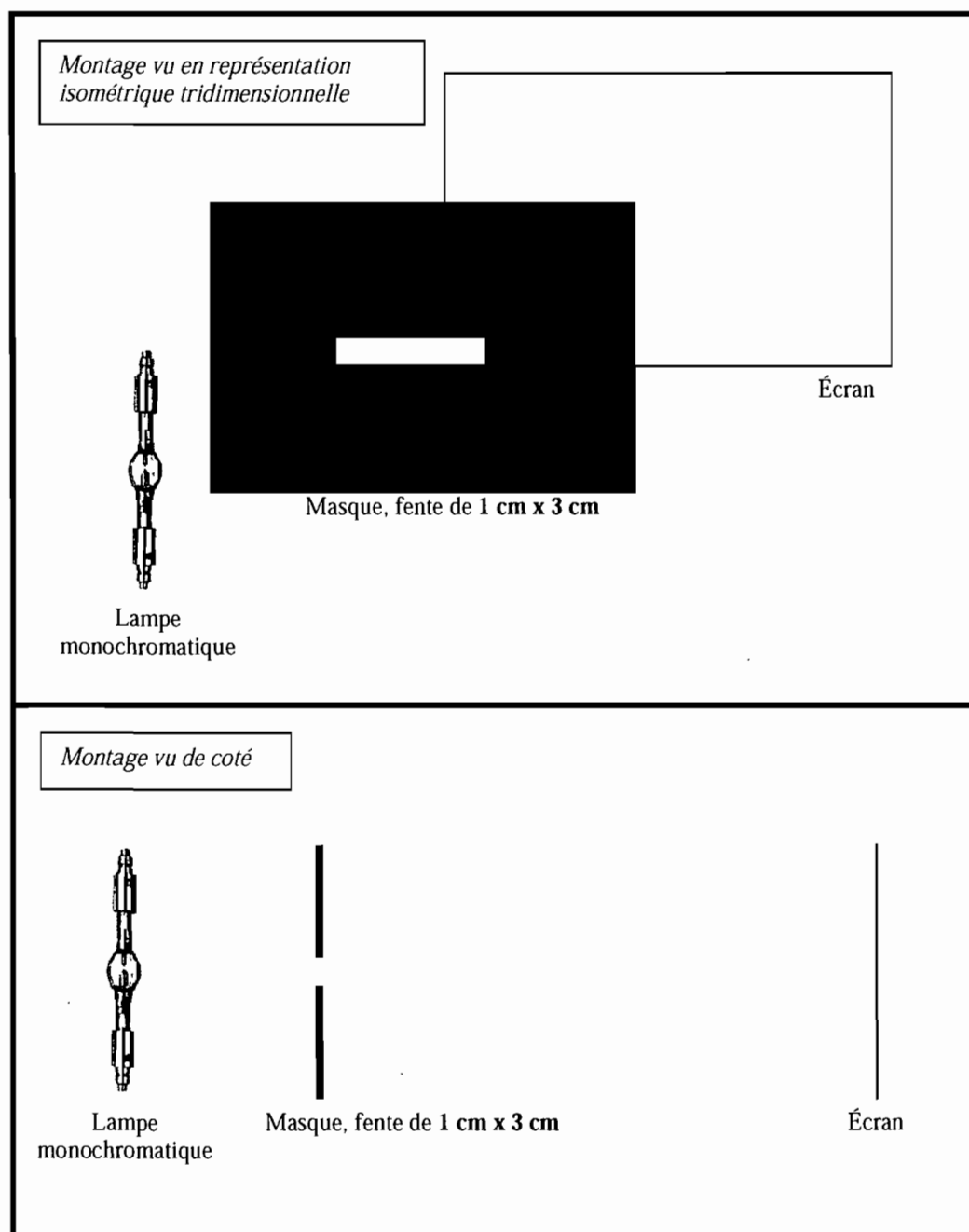


3. Considérer la situation ci-contre.
Le jour le ciel paraît illuminé, même si un nuage se trouve devant le soleil. Expliquer brièvement et compléter le dessin de façon appropriée.



TEST SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Partie B



Considérez un montage tel que celui illustré ci-dessus :

TEST SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Partie B- Répondre à toutes les question par un schéma et une explication

4. Si la lampe est allumée et que la pièce est sombre, que peut-on observer sur l'écran?



5. Si la lampe est éloignée de plus en plus loin du masque, comment-est ce que cela affecterait ce qui est observé sur l'écran?



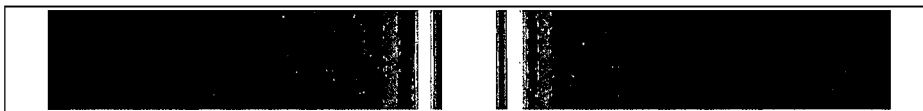
6. En supposant que la lampe soit très loin du masque (et très brillante), si on diminue progressivement la largeur de la fente jusqu'à ce qu'elle devienne très mince, comment-est ce que cela affecterait ce qui est observé sur l'écran?



TEST SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Partie C- Répondre à toutes les question par un schéma et une explication

Considérez maintenant la figure suivante obtenue par la diffraction de la lumière qui traverse une fente mince :



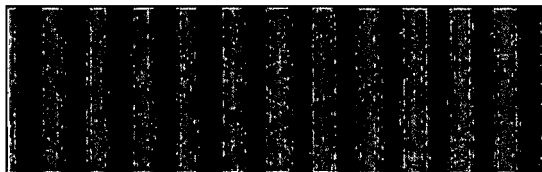
7. Si l'on couvre une portion de la fente allant de son centre à son extrémité droite, comment cela affecterait-il la distance entre les premiers minima de part et d'autre du maximum central?

8. Dans le montage qui permet d'obtenir cette figure, comment se compare la longueur d'onde de la lumière à la largeur de la fente ? (Dites si l'une de ces grandeurs doit être supérieure à l'autre et expliquez pourquoi.)

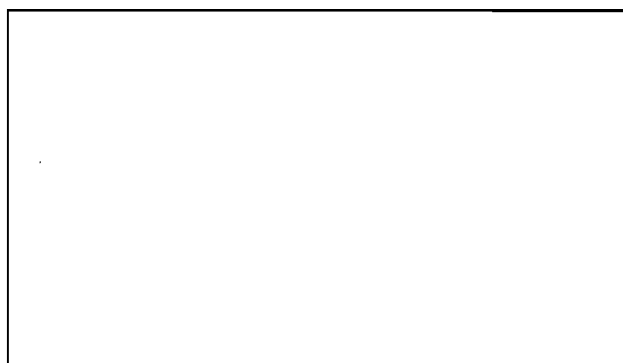
TEST SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Partie D- Répondre à toutes les question par un schéma et une explication

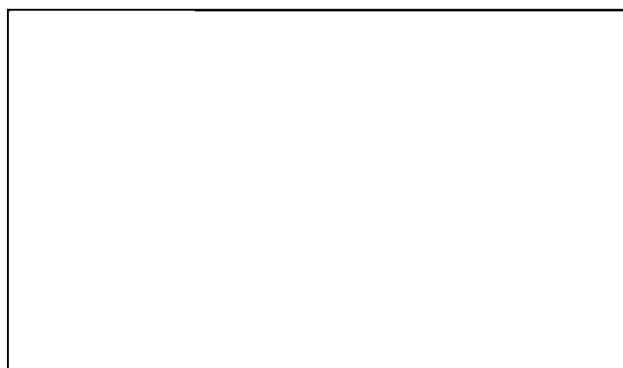
Considérez la figure suivante obtenue par l'interférence de la lumière provenant de deux fentes minces :



9. Si dans le montage qui a permis d'obtenir cette figure on couvre la fente de droite, comment cela affecterait-il la figure?



10. On diminue progressivement l'intensité de la lumière jusqu'à ce que celle-ci soit extrêmement infime, on remplace l'écran par un film photographique et on expose le film pendant une période suffisamment longue pour qu'on puisse obtenir une image visible sur le film lorsqu'il sera développé. Cette figure pourrait-elle être différente de la figure d'interférence précédente? Comment et pourquoi?



Annexe 3 :

Fiches bibliographiques

EMPÉDOCLE

Nationalité : Grec

Période : 484-424 avant J-C

Position

La longue histoire de la lumière commence avec les premiers écrits des philosophes grecs, Pythagore, Empédocle, Démocrite, Aristote, etc. qui s'interrogent davantage sur la vision que sur la nature même de la lumière. Selon la première des « théories », celle des pythagoriciens, nous voyons grâce à la lumière qui sort de notre œil.

Empédocle adhère à ce modèle mais doit le modifier afin d'expliquer pourquoi la vision n'est pas possible dans le noir.

Contribution

Au cinquième siècle avant Jésus Christ, Empédocle a postulé que tout l'univers est composé de quatre éléments ; le feu, air, la terre et l'eau. Il croyait qu'Aphrodite a fabriqué l'œil humain à partir de ces quatre éléments, qu'elle a allumé le feu dans l'œil, que celui-ci a émergé de l'œil et qu'il a ainsi rendu la vue possible.

La logique de ce modèle mène cependant à déduire qu'on devrait pouvoir voir pendant la nuit aussi bien que pendant le jour. Empédocle postule donc une interaction entre les rayons des yeux et les rayons d'une source telle que le soleil. Empédocle considère qu'il doit y avoir non seulement une émission de rayons de l'intérieur vers l'extérieur de l'œil, mais aussi un flux dirigé de l'extérieur vers l'intérieur, portant la forme et la couleur de l'objet.



Contexte social

(extrait de l'article Wikipedia sur Empédocle)

Empédocle fut un personnage important d'Agrigente, défenseur de la démocratie. Il fut banni et termina sa vie dans le Péloponnèse. D'après la légende, Empédocle se jeta dans les fournaises de l'Etna en abandonnant sur le bord une de ses chaussures, preuve de sa mort. Cette histoire est réfutée par Strabon.

Empédocle fut sans doute le plus étrange et le plus excentrique des Présocratiques : il est, selon Nietzsche « la figure la plus bariolée de la philosophie ancienne ». C'était un caractère sérieux, mélancolique et original, s'habillant de pourpre, se montrant une couronne delphique sur la tête, les cheveux longs, le visage fermé. Il voulait qu'on le crût prophète, et il déclare dans ses poèmes qu'on l'honorait comme un dieu. On lui attribue quelques prodiges.

Il a écrit sa pensée sous la forme de poèmes. Il nous en reste environ quatre cents vers. Il fut à la fois ingénieur, philosophe, thaumaturge et poète.

EUCLIDE

Nationalité : Grec
Période : 325-265 avant J-C

Position

Bien qu'il ne propose pas de modèle de la vision différent de celui d'Empédocle, Euclide questionne le modèle des rayons qui émergent des yeux : il se demande comment il se fait qu'on puisse voir les étoiles immédiatement lorsqu'on ouvre les yeux la nuit. Naturellement, par contre si le faisceau de l'œil voyage à une vitesse infinie, ce n'est pas un problème. Ce questionnement sera repris bien des années plus tard par Alhazen

Contribution

Autour de l'an 300 avant Jésus-Christ, Euclide a rédigé, sous le titre d'Éléments une sorte d'encyclopédie des sciences mathématiques en 13 livres. Les Éléments sont une compilation du savoir géométrique et restèrent le noyau de l'enseignement mathématique pendant près de 2000 ans.

Outre la géométrie, Euclide étudie aussi l'optique. Dans le livre Optica, Euclide s'intéresse aux propriétés de la lumière. Euclide commence son livre Optica, comme il commence les Éléments, son étude de la géométrie, par un ensemble d'axiomes évidents en soi.

1. Des lignes (ou les rayons visuels) peuvent être tracées en ligne droite jusqu'à l'objet.
2. Les lignes incidentes sur un objet forment un cône.
3. Les choses sur lesquelles les lignes se dirigent sont vues.
4. Les choses vues sous un plus grand angle semblent plus grandes.
5. Les choses vues par un rayon plus élevé, apparaissent plus hautes.
6. Les rayons droits et gauches apparaissent à droite et à gauche.
7. Les choses vues selon plusieurs angles semblent plus claires.



Euclide n'a pas défini la nature physique de ces rayons visuels, mais en utilisant les principes de la géométrie, il discute des effets de la perspective et de l'arrondissement des objets vus à une distance.

Euclide postule donc que la lumière voyage en lignes droites et représente les rayons de lumière comme des lignes droites.

Contexte social

(extrait de l'article Wikipedia sur Euclide)

On sait très peu de choses relatives à la vie d'Euclide, sinon que c'était un mathématicien grec qui naquit peut-être à Athènes vers 325 avant J.C, qui partit en Égypte pour y enseigner les mathématiques sous le règne de Ptolémée 1^{er} et qui mourut vers 265 avant J.C. Il travailla à la Bibliothèque d'Alexandrie et y fonda l'École des mathématiques. Entouré de ses disciples, il y mena de nombreux travaux de recherche. Il a probablement rencontré Archimède.

Euclide aurait aussi participé, comme beaucoup de mathématiciens de son époque, à la vie politique. Il aurait ainsi fait adopter à Athènes une disposition stipulant que les textes des lois, consignés jusqu'alors dans l'alphabet local, devraient être réédités dans l'alphabet dit de Milet qui donnait sa préférence au sens gauche-droite

HERON D'ALEXANDRIE

Nationalité : Grec

Période : 10 – 70 après J-C

Position

Héron d'Alexandrie croyait que la vision était possible grâce à des rayons lumineux émis par les yeux et se propageant à une vitesse infinie.

Contribution

Alors qu'Euclide limite son analyse à des problèmes de vision directe, Héron D'Alexandrie applique les principes de l'optique géométrique dans un traité nommé *Catoptrica* afin de considérer les problèmes de réflexion de la lumière. Il démontre l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle réfléchi en se basant sur la règle selon laquelle la nature choisit toujours le plus court chemin et que donc le rayon doit suivre le chemin le plus court de l'œil à l'objet. Sur cette base, il arrive à démontrer que l'image formé par un miroir plan apparaît être aussi loin derrière du miroir que la distance réelle entre l'objet et le miroir.

Héron d'Alexandrie commente aussi occasionnellement la nature physique des rayons de vision, indiquant qu'il se propagent à une très grande vitesse de l'œil vers l'objet observé et sont réfléchis par les surfaces lisses mais peuvent rester prisonniers dans les porosités des surfaces non polies.



Contexte social

(extrait de l'article Wikipedia sur Héron d'Alexandrie)

De la jeunesse de Héron d'Alexandrie (dit aussi Héron l'Ancien) on ne sait pas grand chose, si ce n'est qu'il est originaire d'Alexandrie. Les dates de sa naissance et de sa mort ne sont pas connues avec certitude, selon la majorité des historiens il aurait vécu au cours du premier siècle après J.-C.

Il aurait donc vécu vraisemblablement sous l'empire romain. Son œuvre nous a été transmise via quelques uns de ses traités de physique et de mathématiques. Nombres de ses écrits ont été retrouvés en latin et en arabe. Au cours des siècles ils ont été maintes fois retranscrits et l'authenticité de ces textes est parfois remise en cause.

PTOLÉMÉE

Nationalité : Grec

Période : 90-168

Position

Comme Empédocle, Ptolémé considère que les rayons visuels se propagent de l'œil à l'objet observé. Cependant, il considère que les rayons visuels ne sont pas des lignes discrètes comme le pense Euclide et Héron d'Alexandrie, mais forment un cône continu.

Contribution

Cinq cens ans après Euclide, Ptolémée, au deuxième siècle après Jésus-Christ, étudie **quantitativement** le sujet de la réfraction de la lumière.

Ptolémé expose dans un traité nommé Optique quelques expériences visant à mesurer les effets de la réfraction du rayon visuel sur la surface de séparation entre des matières transparentes de densité différente : air/eau, air/verre, verre/eau. De ce traité il survit seulement un vingtaine d'exemplaire d'une traduction en arabe.

Contexte social

(extrait de l'article Wikipedia sur Ptolémée)

Ptolémée était un astronome et astrologue grec qui vécut à Alexandrie (aujourd'hui en Égypte). Il est également l'un des précurseurs de la géographie.



Ptolémée fut l'auteur de plusieurs traités scientifiques, dont deux ont exercé par la suite une très grande influence sur les sciences islamique et européenne. L'un est le traité d'astronomie, qui est aujourd'hui connu sous le nom de l'Almageste. L'autre est la Géographie, qui est une discussion approfondie sur les connaissances géographiques du monde gréco-romain.



Nationalité : Arabe
Période : 955 - 1039

Position

Les savants arabes ont été en possession de la partie principale des travaux helléniques sur l'optique. Ils détiennent les traductions de l'optique d'Euclide, de l'optique de Ptolémée à l'exception du premier livre, de la catoptrique de Héron d'Alexandrie.

Au début du 11^e siècle, Alhazen remet en question le modèle de la vision de l'Antiquité. Alhazen considérait les rayons de lumière comme des jets des particules minuscules qui voyage à une vitesse finie.

Contribution

Alhazen se base sur des observations simples (l'œil est ébloui et peut même être blessé par une lumière trop intense) et sur des arguments logiques (il est possible de voir immédiatement les étoiles lorsqu'on ouvre les yeux la nuit) pour affirmer que la vision ne peut être le fait de rayons qui émergent des yeux. Alhazen développe un modèle où chaque point illuminé d'un objet réfléchi les rayons de lumière dans toutes les directions, mais où seulement un rayon de chaque point, qui heurte l'œil perpendiculairement, peut être vu. Les autres rayons heurtent à différents angles et ne sont pas vus.

Alhazen a écrit, de 1015 à 1021, un traité de sept volumes sur l'optique. La traduction latine de cet ouvrage porte le nom de

ALHAZEN OU EL HASSAN IBN AL-HAYTHAM

l'Opticae thesaurus Alhazeni Arabis. Dans ce traité, Alhazen écrit que lumière ne voyage pas instantanément mais doit voyager à une grande vitesse. Il établit sous sa forme générale la loi de la réflexion, en montrant, à la différence d'Euclide et de Ptolémée, que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire au miroir, ce qui permet d'appliquer la loi au surface réfléchissantes courbes. Il vérifie ensuite cette loi par la construction d'un dispositif expérimental complexe et s'efforce enfin de déterminer le plan tangent pour les miroirs sphériques, cylindriques, coniques aigus, coniques obtus, et les positions respectives de l'image dans chaque cas.

Sans pouvoir expliquer la réfraction, Alhazen suppose que celle-ci est provoquée par la différence de vitesse de propagation de la lumière dans différentes substances. Il démontre aussi que le rayon incident, la normale au point de réfraction et le rayon réfracté sont dans un même plan.

Contexte social

(extrait de l'article Wikipedia sur Alhazen)

Alhazen est né en 980, dans la ville de Bassora dans l'actuel Iraq où il reçut son éducation qu'il compléta cependant dans la ville de Bagdad. À l'époque, Bassora était sous le contrôle de la dynastie des Buwayhides qui régnèrent sur la Perse à cette époque. C'est pourquoi il est parfois mentionné sous le nom d'al-Basri. Bien que la question ne soit pas acceptée par tous, la

plupart des gens s'entendent pour dire qu'il est décédé au Caire en Égypte en 1039.

Alhazen commença sa carrière de scientifique dans sa ville natale de Bassora. Il fut cependant convoqué par le calife Hakim qui voulait régulariser les inondations du Nil qui frappait l'Égypte années après années. Par contre, après avoir mené une expédition en plein désert pour remonter jusqu'à la source du fameux fleuve, Alhazen se rendit compte que ce projet était pratiquement impossible. De retour au Caire, il craignait que le calife qui était furieux de son échec ne se venge et décida donc de feindre la folie. Le calife le confina donc dans sa résidence personnelle.

Alhazen profita de ce temps pour écrire plusieurs livres sur plusieurs sujets variés comme l'astronomie, la médecine, les mathématiques, la méthode scientifique et l'optique. Le nombre exact de ses écrits n'est pas connu avec certitude mais on parle d'un nombre entre 80 et 200. Cependant, peu de ces ouvrages ont survécu jusqu'à nos jours. La plupart de ceux-ci, comme ses livres sur la cosmologie et ses traités sur l'optique, n'ont survécu que grâce à leur traduction latine.

Après la mort du calife Hakim, en 1021, Alhazen cessa de feindre sa folie et put sortir de sa résidence. Il en profita donc pour entreprendre quelques voyages, notamment en Espagne.

RENÉ DESCARTES

Nationalité : française

Période : 1596-1650

Position

Kepler (1571-1630) comme Alhazen (965-1040), plus grand physicien arabe du moyen-âge et fondateur de l'optique, observe que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence quand les angles sont petits. En fait, la relation correcte de la **loi de la réfraction** semble avoir été trouvée – mais non publiée – par Willebrord Snel (1580-1626). Isaac Voss (1618-1689) l'énonça pour la première fois, mais de façon strictement empirique : « *Le chemin parcouru pendant le même temps dans les deux milieux est dans un rapport constant, égal à celui des cosécantes des deux angles.* »

Comme les physiciens de son époque, Descartes a une vision mécaniste et déterministe de la physique. Un des principes fondamentaux de sa philosophie consiste à supposer que la matière est essentiellement étendue. Réciproquement, toute étendue ne peut être que matière. Selon lui, l'Univers tout entier est donc une juxtaposition de matières différentes, dont la finesse est extrêmement variable mais dont la nature reste, au fond, identique. L'engrenage de ces différentes matières subtiles les unes dans les autres se réalise par des procédés tourbillonnaires et produit tous les phénomènes physiques. Entre le Soleil et l'œil s'étend une matière subtile formée de petites sphères de grosseur invariable qui se touchent comme de la grenaille bien tassée. Des corpuscules plus ténus et toujours divisibles par la rencontre avec les autres corps tendent à s'échapper du Soleil et de tous les corps lumineux. Ne rencontrant aucun vide, ils ne peuvent que comprimer le système intermédiaire. Une *force* « *comme tremblante* » va donc s'exercer sur ce milieu. Elle « *se redouble et se relâche à diverses petites secousses* ».

Ainsi, Descartes considère que la lumière n'est pas un véritable mouvement mais une tendance, un phénomène de pression qu'une matière subtile exerce de proche en proche jusqu'à la rétine. Il compare la vision à la sensation du toucher qu'utilise un aveugle pour se diriger :



« *...la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main, par l'entremise de son bâton.* »

Contribution

Dans *La Dioptrique* (1637), Descartes ne mentionne pas le travail de Voss et **substitue le rapport des sinus à celui des cosécantes**. Descartes est le premier à y apporter une sorte d'explication théorique. Sa pensée là-dessus est la même que celle d'Alhazen : il explique que la lumière court plus vite dans les milieux plus denses et que la composante de la vitesse du rayon perpendiculaire à l'interface est modifiée en conséquence, alors que l'autre composante ne l'est pas. Il mentionne :

« *car il est bien aisé à croire que l'action, ou inclination à se mouvoir, que j'ai dit devoir être prise pour la lumière, doit suivre en ceci les mêmes lois que le mouvement.* »

En utilisant un modèle en lequel la lumière se visualise comme une pression transmise à travers un milieu élastique il est alors simple de démontrer que la relation entre les angles i et r est

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_i}{v_r}$$

où v_i et v_r sont les vitesses de la lumière dans le milieu incident et dans le second milieu, respectivement. Cette loi peut être l'objet d'une démonstration mathématique basée sur les principes de la mécanique.

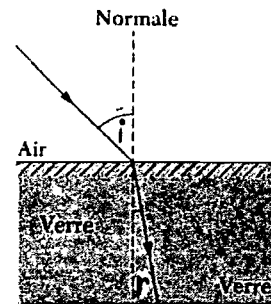


Figure 1 : Réfraction

Descartes étudie aussi la réflexion de la lumière sur une surface plane en comparant ce phénomène au rebondissement d'une balle élastique. La décomposition de la vitesse en composantes verticale et horizontale le conduit à une conclusion correcte : les angles d'incidence et de réflexion sont égaux.

Descartes affirme que la lumière est un phénomène instantané (vitesse de propagation infinie) et qu'elle est produite par des variations rythmiques de pression au sein d'un fluide incompressible. Pourtant, sa

démonstration de la loi de Snell par analogie avec un phénomène de collision, en utilisant un modèle de particules en mouvement, nécessite une vitesse de propagation finie de la lumière.

Contexte social

René Descartes fut un grand et célèbre philosophe français. Il a aussi touché à la physique, aux mathématiques et à la métaphysique. À l'âge de dix ans, il fut admis au collège royal de La Flèche, tenu par les Jésuites. Il eut droit, dès son arrivée, à un régime d'étude particulier, notamment à cause de la supériorité de ses facultés intellectuelles. Mais il remarqua alors que les notions qu'il apprenait, outre les mathématiques, ne lui donnaient aucune certitude. Il conserva toute sa vie l'espoir de trouver une méthode scientifique proposant à l'homme des fins indubitables.

Le 10 novembre 1619, Descartes connut une nuit où il fit des rêves étranges et exaltants. Il découvrit alors sa vraie vocation. Après des années passées à étudier et à voyager, il se mit enfin à réfléchir aux fondements d'une science universelle qui trouverait son origine dans l'humain lui-même.

Descartes a vécu lors de la révolution scientifique française, principal facteur de la formation de la pensée moderne. Descartes s'intéressa à la dioptrique et il fut d'abord inspiré par le traité de Kepler sur ce sujet. Il publia en 1637 la *Dioptrique*, en annexe au *Discours de la méthode*. À la même époque, Pierre de Fermat (1601-1665), sans tenir compte des suppositions de Descartes, déduit de nouveau la loi de la réflexion à partir de son principe de temps minimum (1657). Sa supposition que la nature emprunte toujours le plus court chemin suscita un débat philosophique au sein de la communauté scientifique.

Notons enfin qu'à cette époque, l'existence de la vitesse de la lumière n'est, elle-même, qu'une hypothèse puisque personne n'a encore réussi à la mesurer.

GRIMALDI

Les premières expériences de diffraction de la lumière sont effectuées par Francesco-Maria Grimaldi (1618-1663). Il introduit le mot diffraction pour spécifier le phénomène qu'il vient de découvrir, phénomène, dans lequel on observe qu'un objet éclairé par une source ponctuelle blanche, donne une ombre dont les contours sont bordés de fines traînées lumineuses colorées.

Grimaldi montre que les résultats obtenus ne sont dus ni à de la lumière directe, ni à de la lumière réfractée, ni à de la lumière réfléchie. Il conclut que la lumière dans ce cas se propage de façon différente des trois modes connus précédents. Il appelle diffraction cette nouvelle propagation. La diffraction ne sera correctement expliquée qu'au dix-neuvième siècle par Fizeau à l'aide du principe de Huygens.

Grimaldi compare les bandes colorées autour de l'ombre d'un objet aux ondes circulaires produites à la surface de l'eau par le jet d'une pierre. Pour Grimaldi, la vitesse de la lumière est finie. Les travaux de Grimaldi sont publiés à Bologne en 1665 sous le titre : *Physico-Mathesis de lumine, coloribus et Iride*

THOMAS YOUNG

En 1801, l'hypothèse selon laquelle la lumière est un mouvement ondulatoire réapparaît en Angleterre dans une théorie proposée par Thomas Young (1773–1829). Cette théorie rend compte de plusieurs phénomènes liés à la diffraction à l'aide d'un éther universel et d'un principe d'interférence des ondes. Young démontre, par des expériences simples, que la lumière se comporte comme une onde dans certaines situations. Dans les expériences de Young, un faisceau de lumière diffracte lors du passage par une très petite ouverture. Les expériences de Young démontrent aussi que deux faisceaux de lumière peuvent interférer

entre eux comme des vagues qui se superposent à la surface de l'eau.

À son début, la théorie de Young ne compte que peu d'adeptes en Angleterre. On attribue cet insuccès souvent aux causes suivantes :

1. Peu de contemporain de Young questionnait l'autorité scientifique de Newton,
2. La réputation de Young a été sévèrement endommagée par des attaques d'un Lord de la Société Royale, Lord Brougham, publié dans le *Edinburgh Review*. Celui-ci dit des articles de Young qu'ils sont :

*"paltry and unsubstantial papers (...)
destitute of every species of merit (...)
have no other effect than to check the
progress of science and
renew all those wild phantoms of the
imagination which
Newton put to flight from her temple."*

3. Le style de présentation de Young, autant à l'écrit qu'à l'oral, était obscur.

La théorie de Young présente aussi une faiblesse car elle ne permet pas d'expliquer la polarisation de la lumière. De plus les franges de diffraction ne sont pas vraiment un phénomène nouveau. Elles ont été décrites par Grimaldi au 17^{ème} siècle et les physiciens avaient déjà formulé des explications élaborées basées sur le modèle corpusculaire de la lumière. Ces explications faisaient intervenir des forces d'attraction et de répulsion qui agissent sur les particules alors qu'elles passent près des objets matériels.

AUGUSTIN FRESNEL

En France, la théorie de Young n'attire pas non plus l'intérêt des savants, à quelques exceptions près. Il faut attendre 16 ans pour que l'hypothèse ondulatoire recommence une percée en France grâce à Augustin Fresnel (1788–1827). Fresnel, ingénieur de

formation, s'intéresse à la nature de la lumière dans ses loisirs. En apprenant que Young a aussi étudié la question, Fresnel le rencontre en 1816 pour discuter de sa théorie. La rencontre est courtoise, mais Young affiche tout de même une attitude condescendante face à la paternité de ses idées. Ils sont dès lors en compétition. Fresnel établit donc indépendamment sa propre théorie ondulatoire de lumière en 1817. Cette théorie réussit à rendre compte aussi bien la diffraction que la polarisation de la lumière.

En 1818, les Laplaciens, partisans du modèle corpusculaire de la lumière, organisent un concours sur les franges de diffraction. Les Laplaciens désirent avoir un mémoire qui démontrerait hors de tout doute la nature corpusculaire de la lumière. Fresnel présente un mémoire (sous un faux nom!) et, au grand désarroi du comité, c'est son mémoire qui retient l'attention. Ensuite, dans un des épisodes les plus connus de l'histoire de la physique, Simeon Denis Poisson, un Laplacien, ajoute bien malgré lui au travail mathématique de Fresnel. Poisson démontre mathématiquement que si la théorie ondulatoire de Fresnel s'avère, alors on devrait retrouver un point lumineux situé exactement au centre de l'ombre derrière un obstacle placé sur le trajet d'un faisceau lumineux. Poisson est convaincu que ce point ne pourrait exister et que donc la théorie de Fresnel serait déclarée fausse. Cependant, François Arago (1786-1853) prouve expérimentalement l'existence du fameux point lumineux. Ce point portera ensuite le nom de tache de Poisson. Comme Arago est directeur de l'Observatoire de Paris et aussi membre de l'Académie des sciences, les Laplaciens doivent reconnaître l'excellence du travail rigoureux de Fresnel.

CHRISTIAAN HUYGENS

Nationalité : néerlandaise

Période : 1629-1695

Position

L'observation de la dispersion de la lumière blanche, effectuée par Newton, grâce au prisme, conduisit celui-ci à échafauder l'une des premières théories de la lumière et des couleurs. Huygens, de son côté, trouvait étrange qu'on considère comme démontrées et certaines des théories peu évidentes : celle, par exemple, fondamentale, sur la propagation rectiligne de la lumière, ou celle qui porte sur **l'intersection des rayons sans gêne mutuelle**.

Contribution

Huygens fut le premier à formuler une **théorie ondulatoire de la lumière**. Pour Huygens la lumière, à l'instar du son qui est une onde se propageant dans l'air, est une onde qui se propage dans un milieu hypothétique appelé éther.

En 1678, Huygens énonça un principe servant à prédire la propagation des fronts d'onde : lorsqu'une impulsion lumineuse est émise par une source, les particules avoisinantes de l'éther entrent en mouvement. La lumière se propage parce ce mouvement est communiqué aux particules avoisinantes il s'agit donc d'une **onde longitudinale** et chaque particule agit comme une source de petites ondes secondaires. Le principe de Huygens est essentiellement une construction géométrique servant à déterminer, à un instant donné, la position d'un nouveau front d'onde à partir de ce que l'on connaît d'un front d'onde antérieur. Le principe est le suivant:

Tous les points d'un front d'onde peuvent être considérés comme des sources ponctuelles d'ondes sphériques secondaires (ondelettes) se propageant de façon radiale à des vitesses caractéristiques de la propagation des ondes dans le milieu considéré. Après un temps t , la nouvelle position du front d'onde est la surface tangente aux ondelettes sphériques.



Huygens considérait la vitesse de la lumière comme finie bien que très élevée. Il estimait qu'elle devait être au moins 600 000 fois celle du son. À l'aide de sa théorie, Huygens fut en mesure d'expliquer les **lois de la réflexion et de la réfraction**. Il donna également une explication à la double réfraction.

Contexte social

Physicien et astronome, Christian Huygens acquit sa renommée par ses travaux en dynamique et en optique. Il fut le premier astronome à voir les anneaux de Saturne et découvrit Titan, un de ses satellites. On lui doit aussi l'invention de l'horloge à balancier.

Né en 1629 à La Haye, il fit ses études à l'Université de Leyden, et se lia d'amitié avec René Descartes, fréquemment invité à la maison familiale. La réputation de Huygens en dynamique et en optique se répandit dans toute l'Europe et il devint membre fondateur de la Royal Society en 1663.

Après une visite en Angleterre, au cours de laquelle il rencontra Isaac Newton, Huygens publia un traité sur la théorie ondulatoire de la lumière. Plutôt solitaire, il n'attirait pas les étudiants ou les disciples et mit beaucoup de temps à publier ses découvertes. En dépit de l'élégance de la théorie de Huygens, c'est la théorie de Newton qui sera adoptée pendant tout le XVIII^e siècle, en raison surtout de l'immense prestige de Newton et de sa mécanique.

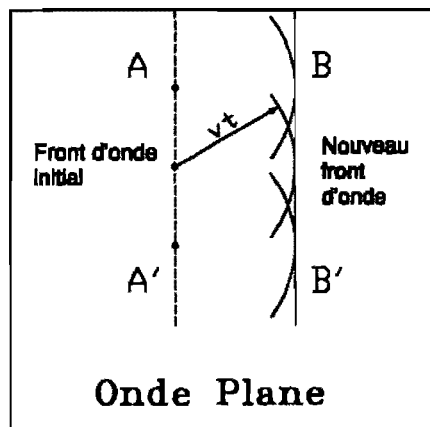


Figure 1 : Fronts d'onde.

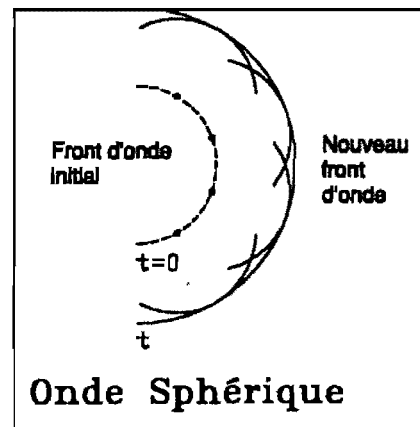


Figure 2 : Application du principe d'Huygens à la réflexion d'une onde plane sur un miroir.

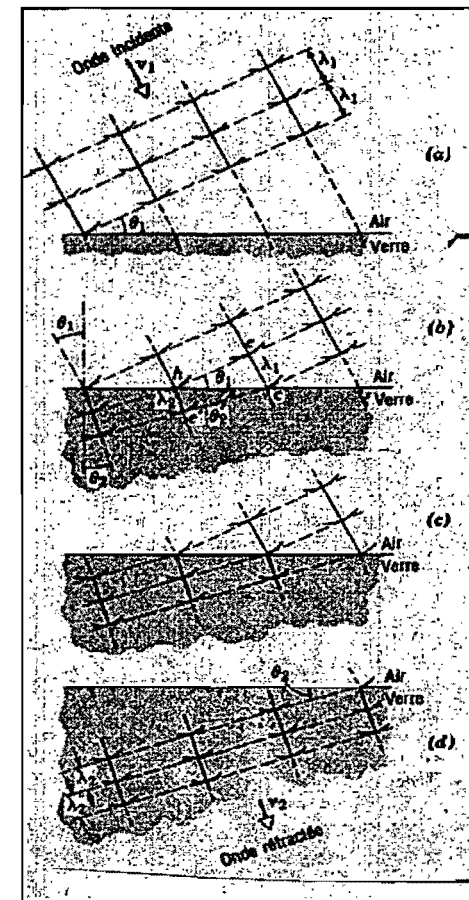


Figure 3 : Application du principe d'Huygens à la réfraction d'une onde à travers une interface plane. Pour plus de simplicité, on a omis de représenter l'onde réfléchi. À remarquer le changement de longueur d'onde qui se produit à la suite de la réfraction.

ISAAC NEWTON

Nationalité : britannique

Période : 1642-1727

Position

À l'époque de Newton, la loi de Snell-Descartes est connue et le modèle de lumière qui lui est associé est celui d'une pression transmise dans un milieu élastique. Les scientifiques utilisent encore, à ce moment, une explication très mécanique des phénomènes qui les entourent. Newton accepte l'idée de Descartes d'un éther pour la transmission de forces électriques et mécaniques, mais n'admet pas la théorie de la lumière comme une propagation sous forme de **pression** à travers cet éther.

De plus, Newton rejette le modèle ondulatoire de la lumière proposé par Huygens et ses collègues. Le modèle corpusculaire de Newton permet d'expliquer la réflexion et la réfraction de la lumière. Par contre Newton connaît le phénomène de diffraction et observe aussi des franges d'intensité sombre et lumineuse mais ne peut les expliquer.

Contribution

Newton proposa un **modèle corpusculaire** de la lumière. Dans ce modèle, on concevait la lumière comme un faisceau de fines particules émises par une source lumineuse. Cette théorie lui permettait de rendre compte des lois régissant la réflexion et la réfraction de la lumière.

La **réflexion** de la lumière par une surface s'explique, dans ce modèle, par la collision parfaitement élastique des particules contre une surface réfléchissante sans frottement. Ainsi, au moment de la réflexion, la composante de la vitesse perpendiculaire à la surface est renversée, alors que la composante parallèle demeure la même.

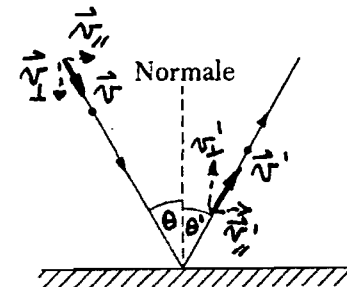


Figure 1 : Réflexion

Pour Newton, la **réfraction** est due à l'existence de forces s'exerçant à courte distance sur les corpuscules de lumière qui pénètrent dans un milieu. Prenons par exemple une interface air-eau. Les forces imaginées par Newton agissent perpendiculairement à la surface. Elles laissent donc inchangée la composante de la vitesse parallèle et n'affectent que la composante perpendiculaire.

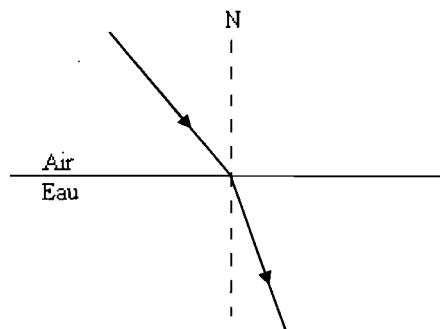


Figure 2 : Réfraction

Pour rendre compte de la déviation relative des rayons, la loi de composition des vitesses entraîne nécessairement que la composante perpendiculaire dans l'eau ait été augmentée par rapport à la composante perpendiculaire dans l'air. Pour assurer la cohérence de la théorie newtonienne, il faut donc affirmer que plus le milieu est réfringent (dense), plus la vitesse de la lumière est grande.

$$v_{\text{eau}} > v_{\text{air}}$$

Ce rapport n'a pu être confirmé expérimentalement à l'époque de Newton, car on ne disposait, dans ce temps, d'aucun moyen pour mesurer la vitesse de la lumière dans un milieu autre que l'air.

L'action de forces s'exerçant sur les corps opaques est également évoquée par Newton pour expliquer la **dévi**ation que subissent les flux de corpuscules lorsqu'ils touchent différents corps. De plus, Newton étudia la dispersion de la lumière à l'aide d'un prisme. Il expliqua ce phénomène en soutenant que les corpuscules de lumière associés aux différentes couleurs excitent l'éther en vibrations caractéristiques.

Contexte social

Le prestige attribué à Newton provient surtout de sa démonstration mathématique de la loi de la gravitation qui régit le « système du monde ». Newton a étudié à Cambridge (Angleterre). Il mit à profit des vacances forcées en raison de la peste qui ravagea la région pour étudier la nature de la lumière. À l'âge de 29 ans, Newton fut élu à la *Royal Society* de Londres pour l'invention de son télescope. L'instrument avait pour objectif un miroir concave. Le faisceau réfléchi était renvoyé latéralement, à l'aide d'un miroir plan incliné sur l'axe du miroir concave, et placé à une petite distance du foyer de l'objectif.

En 1672, Newton décida de présenter une communication importante décrivant ses travaux sur la lumière des années 1666 et 1667. Cette communication allait rendre Newton célèbre tout d'un coup. Il fut reconnu associé étranger de l'*Académie des Sciences* de Paris et président (à partir de 1703 et jusqu'à sa mort) de la *Royal Society*. Son prestige est donc reconnu. Il faut dire qu'à cette époque, la compétition scientifique est forte. La reconnaissance passe par les académies, mais le savoir se développe dans les universités.

Newton publia deux articles importants: *Philosophiae Naturalis Principia mathematica* (1687) et *Optics* (1704). Le second marqua une date importante dans l'histoire de la science physique moderne et eut sur les contemporains de Newton un effet considérable. Le souci nouveau des physiciens de l'époque de Newton d'adopter une nouvelle démarche intellectuelle est illustré par la première phrase de son traité :

« Mon dessein dans cet ouvrage n'est pas d'expliquer les propriétés de la lumière par des *hypothèses*; mais de les exposer nuement pour les *prouver* par le raisonnement, et par des expériences ».

Ses découvertes firent pourtant l'objet de nombreuses controverses et de querelles de priorité dont il allait très vite avoir une horreur profonde. Il y eut notamment plusieurs années d'affrontement entre Isaac Newton et Robert Hooke à propos de la lumière (et de la gravitation). Newton, afin d'éviter une nouvelle controverse, ne consentit pas à publier son ouvrage d'optique avant la mort de Hooke. Celui-ci mourut en 1703 et *Optics* fut publié dès 1704 accompagné de deux traités de mathématiques.

OLAÜS RÖMER

Nationalité : danoise
Période : 1644-1710

Position

À l'époque où Newton développa sa théorie des couleurs (1669), on ne savait pas encore si la lumière se propageait instantanément ou pas. Pourtant, cette question avait déjà depuis longtemps été soulevée. Le philosophe grec Empédocle soutenait que la lumière du soleil devait prendre un certain temps pour atteindre la Terre. Par contre, Aristote était d'avis contraire, et même Descartes pensait que la **lumière voyageait instantanément**.

En 1610, Galilée fut le premier à tenter de mesurer la vitesse de la lumière. Il installa deux personnes loin l'une de l'autre, chacune munie d'une lanterne recouverte. Le principe est le suivant : L'une des deux personnes dévoile sa lanterne et l'autre dévoile la sienne immédiatement après avoir aperçu la lumière provenant de la première. La vitesse obtenue sera donc la distance aller-retour entre les deux observateurs divisée par le temps entre le moment où le premier observateur dévoile sa lanterne et celui où il aperçoit la lanterne du deuxième expérimentateur. Avec des expérimentateurs placés à un kilomètre l'un de l'autre, Galilée ne put détecter de délai. Son système était inadapté, car la lumière se propage trop vite pour permettre de donner le moindre résultat avec cette méthode.

Contribution

En 1676, Römer fut le premier à réussir la mesure de la vitesse de propagation de la lumière. Observant des écarts dans les horaires d'occultation du satellite Io de Jupiter, il les attribua à la variation de la distance Terre-Jupiter et au temps que la lumière met pour parcourir le trajet séparant Jupiter d'un observateur terrestre. **Römer établit la finitude de la vitesse de la lumière, qu'il évalua à 210 000 km/s.** (Voir Benson p. 110-111.)



Contexte social

La mesure de Römer a été permise par l'essor des instruments astronomiques, par celle de l'astronomie d'observation et par l'amélioration des techniques de mesure. Elle a été réalisée dans le nouvel observatoire de Paris.

L'époque est caractérisée par un changement radical de la démarche des physiciens. Leur approche, très largement inspirée de Galilée d'ailleurs, s'écarte de la prétention antérieure de la philosophie. Non que les sciences et la philosophie rompent leurs liens, mais une discipline scientifique ne sera plus jamais conçue uniquement comme la projection d'une philosophie générale. La physique devient une discipline aussi autonome que possible, servant à l'occasion à justifier ou à étayer une thèse philosophique.

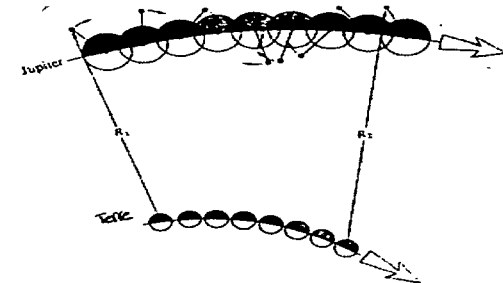


Figure 1. Mesure de Römer pour trouver c
(Tiré de Hetch, E. *Optics*)

HIPPOLYTE FIZEAU

Nationalité : française
Période : 1819-1896



Position

Bien qu'une méthode astronomique eut été développée par Römer pour mesurer la vitesse de la lumière, personne n'avait encore réussi à la mesurer entre deux points sur Terre. Les méthodes astronomiques utilisaient des déductions indirectes qui se basaient sur les petites variations apparentes de la position des astres. L'insuccès de la mesure terrestre de la vitesse de propagation de la lumière était dû notamment à la lente réponse du réflexe humain. Fizeau chercha à résoudre ce problème en utilisant un marqueur de temps plus rapide que le réflexe humain.

Contribution

On doit donc à Fizeau, en 1849, la première expérience de **mesure de la vitesse de la lumière** effectuée en dehors de l'astronomie. Elle utilise la méthode de la roue dentée. Le principe est le suivant : la lumière passe par des fentes situées sur une roue tournant à une vitesse angulaire suffisamment rapide pour que le faisceau lumineux réfléchi à grande distance de la roue ne retombe sur la dent consécutive à la fente. On déduit la vitesse de la lumière de la distance franchie et de la vitesse de rotation de la roue. (Voir Benson p. 111-112.)

Fizeau obtint pour c environ 315 000 km/s en utilisant ce système mécanique. L'avantage de la méthode de Fizeau est qu'en employant une roue dentée tournant à grande vitesse pour produire des impulsions brèves, Fizeau put utiliser une distance assez courte (celle séparant le belvédère de sa maison de Suresnes et la fenêtre d'une maison de Montmartre : 8 km). Grâce à cette expérience et à d'autres semblables développées par Foucault, il était désormais **possible de mesurer la vitesse de la lumière dans différents milieux**. Ces mesures permirent de déterminer que **la vitesse de la lumière dans l'air est plus grande que dans l'eau** ($v_{\text{air}} > v_{\text{eau}}$). Ceci démolit le modèle corpusculaire et donna raison au modèle ondulatoire.

Contexte social

La vitesse de la lumière dans les milieux matériels intéressait les scientifiques de l'époque. L'optique était en attente de cette expérience cruciale, car la théorie corpusculaire impliquait que la vitesse de propagation de la lumière fût proportionnelle à l'indice de réfraction, tandis que la théorie ondulatoire professait le contraire.

C'est ainsi qu'Arago, espérant trouver une confirmation de la théorie ondulatoire par des mesures comparatives de la vitesse de propagation dans des milieux différents, s'adressa à Fizeau et à Foucault. Chacun espérant arriver seul à résoudre ce problème, ils mirent fin à leur collaboration tout en conservant leurs des amicaux. Ils se lancèrent donc tous les deux dans la détermination de la vitesse de la lumière. Fizeau y parvint le premier, en 1849. En 1851, il fit des mesures de la vitesse de la lumière dans les corps en mouvement (dont l'eau), et obtint ainsi le grand prix décerné par l'*Institut* en 1856.

L'expérience de Fizeau témoigne de la tendance de son époque. L'importance et le coût des équipements expérimentaux se sont accrus. De plus, le langage de la physique s'est profondément transformé. Il a gagné en concision et les articles courts et précis se sont progressivement substitués aux longs mémoires du début du siècle. La part des mathématiques dans les formulations de la physique a nettement augmenté et le souci de précision ainsi que la volonté d'évaluer autant que possible les incertitudes des résultats ont gagné du terrain chez les physiciens.

JAMES CLERK MAXWELL

Nationalité : écossaise
Période : 1831-1879

Position

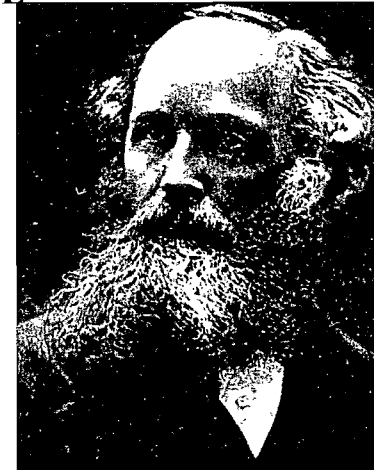
À l'époque de Maxwell, plusieurs méthodes ont déjà été utilisées avec succès pour mesurer la vitesse de la lumière. Cependant, la théorie ondulatoire énoncée par Huygens utilisait le concept d'onde longitudinale. Ce n'est qu'au début du XIX^e siècle que Young et Fresnel établirent la **transversalité des ondes lumineuses** et développèrent la nouvelle théorie ondulatoire de la lumière qui, contrairement à l'ancienne, permettait d'expliquer la polarisation de la lumière.

C'est en se basant sur cette théorie que Maxwell prolongea les travaux de Faraday sur les **fondements de l'électromagnétisme** et les décrit en termes mathématiques. Il synthétisa toutes les lois de l'électromagnétisme en un tout cohérent dans son article *A dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1864) et les expliqua plus en détail dans *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), un ouvrage encore utilisable aujourd'hui, en dépit d'une notation un peu vieillotte.

La découverte principale de Faraday est l'induction électromagnétique : le fait qu'un champ magnétique variable induise un courant électrique dans une boucle de fil fermée. Ainsi, non seulement l'électricité en mouvement peut-elle produire un champ magnétique, mais l'inverse est vrai aussi. Faraday n'était pas mathématicien et ne formalisa pas ses découvertes autant qu'elles auraient pu l'être. Il utilisa cependant les notions de champ magnétique et de champ électrique, les concevant comme des lignes de force qui s'étendent dans l'espace.

Contribution

Maxwell identifia la lumière à une onde électro-magnétique après avoir montré que ces ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière telle que mesurée par ses prédécesseurs (Fizeau, Foucault, etc.).



Il dut introduire la notion de courant de déplacement pour que l'ensemble des lois mathématiques de l'électricité et du magnétisme ne soient pas en contradiction avec la conservation de la quantité de charge électrique. Toutes ces lois peuvent alors être exprimées sous la forme d'équations appelées équations de Maxwell et forment la base de l'électromagnétisme tel qu'il est encore enseigné aujourd'hui.

Loi de Gauss	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$
Absence de monopole magnétique	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
Loi de Faraday (induction)	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t}$
Loi d'Ampère	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} + \mu_0 I$

Maxwell, dans son cheminement vers la synthèse de l'électromagnétisme, utilisa au départ un modèle mécanique, dans lequel les phénomènes électromagnétiques étaient vus comme des écoulements et des tourbillons dans l'éther.

Il s'aperçut ensuite que ce modèle ne servait que de support à son imagination et que l'essence des lois de l'électromagnétisme résidait dans leur description mathématique, c'est-à-dire dans les notions de champs électrique et magnétique et dans les équations qu'il avait rassemblées.

Il abandonna alors toute référence à son modèle mécanique. Les lois de l'électromagnétisme prirent ainsi une tournure plus abstraite et minimale. L'une des conséquences de la théorie de Maxwell est que les champs électromagnétiques peuvent s'influencer les uns les autres même quand aucune charge ou courant électrique n'est présent. Autrement dit, les champs électromagnétiques ont une dynamique propre, indépendante de la matière. Il ressort immédiatement des équations de Maxwell que **l'influence mutuelle des champs électrique et magnétique** se propage de proche en proche, comme une onde, à la vitesse

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}.$$

En résumé, Maxwell **conclut que la lumière est un phénomène électromagnétique** : une onde électromagnétique. Pour lui, le mystère de la lumière est résolu : la lumière n'est qu'une oscillation de champs électrique et magnétique s'influencant mutuellement par la loi de l'induction et la loi d'Ampère, telles que décrites par les équations de Maxwell. L'onde électromagnétique est une oscillation transversale, car les champs **E** et **B** sont perpendiculaires à la direction de propagation.

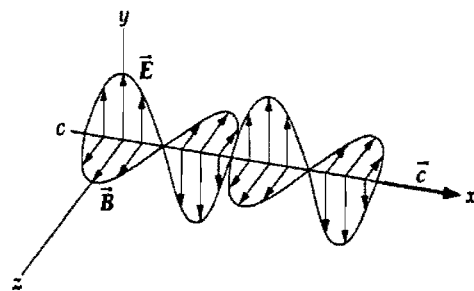


Figure 1 Onde électromagnétique plane, polarisée et sinusoïdale se propageant à la vitesse c dans le sens des x positifs. Ce schéma représente l'onde à un instant donné. On remarque les variations sinusoïdales de \vec{E} et de \vec{B} en fonction de x .

Contexte social

Fils d'avocat, Maxwell eut une vie plutôt aisée. Il étudia à l'université de Cambridge sous la direction des meilleurs professeurs de l'époque. En 1855, il reçut son diplôme de l'université de Cambridge, alors qu'il ne cessait de s'y affirmer. Par la suite, il reçut quantité de prix et mentions d'honneur pour ses travaux.

C'est Maxwell qui donne une solution en 1864 avec les ondes électromagnétiques qui permet, comme le montre Lorentz en 1875, de rendre compte des lois de la réflexion et de la réfraction au point de vue de l'intensité lumineuse. Par la suite, en 1865, Maxwell rédige le célèbre *Treatise on Electricity and Magnetism*. C'est finalement en 1871 qu'il fut engagé en tant que premier professeur de physique expérimentale de Cambridge où il supervisa la création du laboratoire Cavendish.

Les découvertes de Hertz en 1888 firent passer les ondes électromagnétiques de la théorie à l'expérience et assurèrent le triomphe définitif des prévisions de Maxwell.

Pendant la vie de Maxwell, la Grande-Bretagne connaissait une grande période d'évolution. Depuis la première révolution industrielle vers 1780, l'Angleterre était le laboratoire d'un profond changement économique et social. Encore au XIX^e siècle, Londres était le centre d'un important réseau commercial lié à l'industrialisation. En 1851, alors que Maxwell avait vingt ans, eut lieu l'Exposition universelle de Londres, la première du genre, qui symbolisa la suprématie industrielle britannique. Effectivement, à ce moment-là la Grande-Bretagne avait un pas d'avance sur le reste du monde, entre autres avec son réseau ferroviaire couvrant 10600 km et le câble télégraphique permettant des communications instantanées. Œuvrant à Cambridge, Maxwell était donc au cœur intellectuel d'un monde en rapide changement.

ALBERT EINSTEIN

Nationalité : allemande
Période : 1879-1955

Position

À l'époque d'Einstein, la **théorie électromagnétique** est en pleine expansion. Un phénomène découvert par Hertz en 1887 laissait toutefois les spécialistes perplexes: **l'effet photoélectrique**. Des lois empiriques très claires étaient édictées, mais personne n'avait encore pu en donner une interprétation quelconque. Cet effet restait donc un mystère de la nature. Il peut se produire quand une plaque de métal est éclairée par un faisceau lumineux. On observe alors des électrons jaillissant du métal.

Contribution

S'appuyant sur l'hypothèse des quanta de Plank, Einstein croit que la **lumière est composée de petits paquets d'énergie qu'il appella *photons***. Chaque photon possède une énergie $E = hf$ (h est la constante de Planck et vaut $6,626 \times 10^{-34}$ J-s). Les photons se déplacent à la vitesse c , qui est celle de la lumière et qui vaut 300 000 km/s. La masse des photons est nulle, mais ils possèdent une quantité de mouvement $p = E / c = hf / c$. À ces photons l'on peut également associer un comportement ondulatoire. Leur longueur d'onde est donnée par l'équation $\lambda = h / p = c / f$.

À partir de son modèle, Einstein fut en mesure de donner une explication à l'effet photoélectrique. La théorie électromagnétique de Maxwell était incapable d'expliquer ce phénomène. Se basant sur les résultats de l'expérience de Michelson et Morley, Einstein démontra que la notion d'éther était inutile et que la vitesse de la lumière dans le vide était constante.

Trois faits saillants concernant l'effet photoélectrique ne peuvent cependant être expliqués par le modèle classique de la théorie ondulatoire de la lumière:



1. La théorie ondulatoire donne à prévoir que l'énergie cinétique des photoélectrons doit augmenter lorsque le faisceau de lumière devient plus intense. Toutefois, comme le montre la figure 1, l'énergie cinétique maximale des photoélectrons, $K_{max} (=eV_0)$, ne dépend pas de l'intensité de la lumière.
2. Selon la théorie ondulatoire, l'effet photoélectrique doit se produire à n'importe quelle fréquence de la lumière, si l'intensité de celle-ci est suffisante. Toutefois, comme le montre la figure 2, il existe, pour chaque potentiel d'arrêt, une *fréquence de coupure* f_0 . À des fréquences moindres, l'effet photoélectrique disparaît, quelle que soit l'intensité de la lumière incidente.
3. Si l'énergie des photoélectrons est transmise progressivement à la plaque métallique, il est peu probable que la surface réelle de la cible d'un photoélectron soit plus grande que quelques diamètres atomiques. Ainsi, si la lumière est faible, il doit y avoir un délai qu'on peut mesurer entre la collision de la lumière avec la surface et l'éjection de l'électron. Durant cet intervalle, l'électron doit absorber peu à peu l'énergie de l'onde jusqu'à ce qu'il ait accumulé assez d'énergie pour quitter le métal. Toutefois, aucun délai mesurable n'a été détecté.

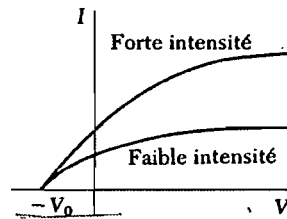


Figure 1 Courant photoélectrique en fonction de la tension pour deux intensités lumineuses. Le courant augmente avec l'intensité, mais il atteint un niveau de saturation à des valeurs élevées de V . Lorsque la tension est égale ou inférieure à $-V_0$, le courant est nul.

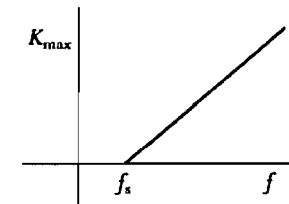


Figure 2 Courbe de K_{\max} en fonction de la fréquence dans le cas de photoélectrons. Les photons dont la fréquence est inférieure à f_0 ne sont pas suffisamment énergétiques pour éjecter un électron du métal.

(Tiré de Serway Raymond A., *Physique III, Optique et physique moderne*)

Si l'on applique le concept du photon d'Einstein à l'effet photoélectrique, on obtient:

$$hf = \varphi + K_{\max}$$

où hf est l'énergie du photon. Cette équation montre qu'un photon transporte une énergie hf jusqu'à la surface du métal, où il est absorbé par un seul électron. Une partie de cette énergie (φ) est utilisée pour extraire l'électron du métal. Le reste de l'énergie ($hf - \varphi$) devient l'énergie cinétique de l'électron. La théorie d'Einstein répond aux trois objections précédentes.

Objection 1: l'absence d'une dépendance de K_{\max} par rapport à l'intensité de la lumière incidente. Si on double l'intensité de la lumière on double le nombre de photons et on double ainsi le courant photoélectrique; l'énergie (hf) d'un seul photon ne change pas.

Objection 2: l'existence d'une fréquence de coupure. En effet, si $K_{\max} = 0$, on a alors $hf_0 = \varphi$, ce qui veut dire que lorsque l'énergie du photon n'excède pas l'énergie d'excitation, les électrons ne peuvent pas se libérer de la surface.

Quant à l'objection 3, l'absence d'un intervalle de temps, elle découle de la théorie du photon, puisque l'énergie requise est fournie sous la forme d'un paquet concentré. Elle n'est donc pas répartie sur une grande surface, comme dans la théorie ondulatoire.

Le début du XX^{ème} siècle apporta donc l'importante découverte des photons, introduits par Einstein (1905) à la suite des travaux de Plank. Depuis de Broglie, le modèle adopté par **la communauté scientifique admet la dualité onde-corpuscule**. Cette théorie permet de concilier les aspects ondulatoires et corpusculaires et s'applique du reste à tous les types de particules.

Contexte social

Enfant, Einstein était un élève que certaines personnes qualifiaient de médiocre, sauf en littérature et en mathématiques où il était assez brillant. Il détestait les sports autant que la gymnastique et éprouvait un dégoût inné pour toutes les compétitions. Il publia en 1905 trois mémoires, tous trois d'une importance cruciale: la théorie statistique du mouvement brownien, l'interprétation de l'effet photoélectrique et la théorie de la relativité restreinte, qui modifiait les lois de la mécanique newtonienne et posait l'équivalence masse-énergie $E = mc^2$.

En 1911, le congrès Solvay réunit les plus grands noms de la physique (Einstein, Plank, Curie, etc.). Grâce aux brouillons du compte-rendu de ce congrès, le jeune Louis de Broglie prit connaissance des idées d'Einstein. C'est à partir des travaux que de Broglie entreprit par la suite que les photons ne sont plus les seuls corpuscules auxquels on associe une onde. En 1921, le prix Nobel de physique fut décerné à Einstein pour l'explication du phénomène photoélectrique et ses travaux dans le domaine de la physique théorique.

L'influence d'Einstein sur la physique contemporaine a été immense: la mutation qu'il a provoquée dans l'histoire des sciences a pu être comparée à celle dont Newton avait été l'initiateur deux siècles plus tôt. Il passa les trente dernières années de sa vie à travailler à sa théorie de grande unification. Son ambition était de créer une théorie qui aurait unifié les quatre forces fondamentales de la nature: gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire et faible. Il n'y parvint jamais, et personne n'y est encore parvenu à ce jour.